
BACHELORARBEIT

Herr

Martin Gräßner

**Bemessung unbefestigter
Druckbehälter - Normenvergleich
zwischen DIN EN 13445 und
AD 2000-Merkblatt**

Mittweida, 2015

BACHELORARBEIT

Bemessung unbefestigter Druckbehälter - Normenvergleich zwischen DIN EN 13445 und AD 2000-Merkblatt

Autor:

Herr

Martin Gräßner

Studiengang:

Stahl- und Metallbau

Seminargruppe:

SM08w1 - B

Erstprüfer:

Prof. Dr.-Ing. Peter Hübner

Zweitprüfer:

Dipl.- Ing. Heiko Bähr

Einreichung:

Mittweida, 20.01.2015

Verteidigung/Bewertung:

Mittweida, 2015

BACHELORTHESIS

Rated nonfired pressure vessels standard comparison between DIN EN 13445 and AD2000-Merkblatt

author:

Mr.

Martin Gräßner

course of studies:

Stahl- und Metallbau

seminar group:

SM08w1 - B

first examiner:

Prof. Dr.-Ing. Peter Hübner

second examiner:

Dipl.- Ing. Heiko Bähr

submission:

Mittweida, 20.01.2015

defence/ evaluation:

Mittweida, 2015

Bibliographische Beschreibung

Gräßner, Martin (SM08W1-B):

Bemessung unbefestigter Druckbehälter unter dem Aspekt des Normenvergleichs zwischen DIN EN 13445 und AD 2000 - Merkblatt - 64 Seiten

Mittweida, Hochschule Mittweida, Fachbereich Maschinenbau / Feinwerktechnik, Bachelorarbeit 2015

Referat:

Ziel dieser Arbeit ist ein Vergleich zwischen DIN EN 13445 und AD 2000 - Merkblatt zur Bemessung unbefestigter Druckbehälter.

Zur Verdeutlichung wird ein fiktives Beispiel berechnet, um somit die auftretenden Differenzen zwischen den beiden Normen aufzuzeigen.

1. Inhaltsverzeichnis

1. Inhaltsverzeichnis.....	5
2. Tabellenverzeichnis	7
3. Abbildungsverzeichnis	8
4. Einleitung	9
5. Ziel der Arbeit.....	10
6. unbefeuerte Druckbehälter.....	11
6.1 Mantel	12
6.2 Behälterböden.....	14
6.3 Ausschnitte in der Behälterwand	16
7. AD 2000 - Merkblätter	18
8. DIN EN 13445	19
9. angewendete Materialien	20
10. Beschreibung des Rechenbeispiels	22
11. Berechnung nach AD 2000 mit P295GH.....	23
11.1 Behältermantel nach AD 2000 - Merkblatt B 1	23
11.2 Behälterboden nach AD 2000 - Merkblatt B 3.....	25
11.3 Behälterausschnitt nach AD 2000 - Merkblatt B 9.....	28
12. Berechnung nach DIN EN 13445 mit P295GH.....	31
12.1 Zylindermantel nach DIN EN 13445-3	31
12.2 Gewölbter Boden in Klöpperform	34
nach DIN EN 13445-3.....	34
12.3 Ausschnitt mit Verstärkungsring nach	39
DIN EN 13445-3.....	39

13. Berechnung nach AD 2000 mit X2CrNiN18-7	42
13.1 Behältermantel nach AD 2000-Merkblatt B 1	43
13.2 Behälterboden nach AD 2000-Merkblatt B 3.....	45
13.3 Behälterausschnitt nach AD 2000-Merkblatt B 9.....	48
14. Berechnung nach DIN EN 13445 mit	51
X2CrNiN18-7	51
14.1 Zylindermantel nach DIN EN 13445-3	51
14.2 Gewölbter Boden in Klöpperform nach	54
DIN EN 13445-3.....	54
14.3 Ausschnitt mit Verstärkungsring nach.....	58
DIN EN 13445-3.....	58
15. Gegenüberstellung der Ergebnisse	60
16. Fazit	62
17. Literaturverzeichnis	63
18. Eigenständigkeitserklärung	64

2. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Kennwerte für Mindestdehngrenze	20
Tabelle 2: Mindestwert Dehngrenze Austenit.....	20
Tabelle 3: Prüfgruppen für Druckbehälter aus Stahl	21
Tabelle 4: Sicherheitsbeiwerte AD-B0;2000 Tafel 2.....	24
Tabelle 5: Grenzabmaße DIN EN 10029 Tab. 1	24
Tabelle 6: Schweißnahtfaktoren nach DIN EN 13445-3.....	32
Tabelle 7: Grenzabmaße DIN EN 10029 Tab.1	33
Tabelle 8: Mindestwerte Dehngrenze für austenitische Werkstoffe.....	42
Tabelle 9: Sicherheitsbeiwerte AD-B0; 2000 Tafel 2.....	43
Tabelle 10: Grenzabmaße DIN EN 10029 Tab.1	44
Tabelle 11: Mechanische Eigenschaften Austenit.....	52
Tabelle 12: Berechnungswanddicke der Zylindermantel	60
Tabelle 13: Berechnungswanddicke der Böden	60
Tabelle 14: Ausnutzung der Spannung im Mannloch.....	61

3. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: geborstener Behälter bei Prüfdruck.....	9
Abbildung 2: links Druckbehälter in Kugelform, . rechts Druckbehälter in Zylinderform.....	12
Abbildung 3: Beanspruchungen des Behältermantels.....	13
Abbildung 4: ebener Boden einer Flanschverbindung.....	14
Abbildung 5: gekremter ebener Boden.....	14
Abbildung 6: Halbkugelboden	15
Abbildung 7: Übersicht gewölbte Böden	15
Abbildung 8: eingesetzter Stutzen.....	16
Abbildung 9: Verstärkungsscheibe.....	17
Abbildung 10: AD 2000 Taschenbuch.....	18
Abbildung 11: Ansichtszeichnung Rechenbeispiel	22
Abbildung 12: Klöpperboden nach DIN 28011	26
Abbildung 13: Berechnungsschema für Ausschnitte in Behältern	28
Abbildung 14: Geometrie Boden	34
Abbildung 15: Berechnungsbeiwert $\beta = 0,75$ für Auslegung	35
Abbildung 16: Berechnungsbeiwert $\beta = 0,74$ für Nachberechnung	37
Abbildung 17: Einzelausschnitt mit Verstärkungsring.....	39
Abbildung 18: Klöpperboden Nach DIN 28011	46
Abbildung 19: Berechnungsschema für Ausschnitte in Behältern	48
Abbildung 20: Berechnungsbeiwert $\beta = 0,76$ für Auslegung	55
Abbildung 21: Berechnungsbeiwert $\beta = 0,76$ für Nachberechnung	57

4. Einleitung

Mit Beginn der Industriellen Revolution und der Verbreitung der Mechanisierung durch dampfgetriebene Aggregate wurde ein Bauteil schnell unabdingbar, der Druckbehälter als eine der zentralen Komponenten zur Dampferzeugung und Zwischenspeicherung. Das Gefahrenpotenzial eines unter erhöhtem Innendruck stehenden Stahlgefäßes wurde schnell in das Bewusstsein gerufen und das oftmals mit verheerenden Folgen. So war bereits früh das Bestreben nach einem „sicheren“ Berechnungsverfahren geweckt, um die Risiken zu minimieren. Diese Arbeit als abschließendes Projekt für das Bachelor - Studium Stahl- und Metallbau beschäftigt sich mit zwei der aktuellsten Normen für die Konstruktion und Bemessung von unbefeuerten Druckbehältern.

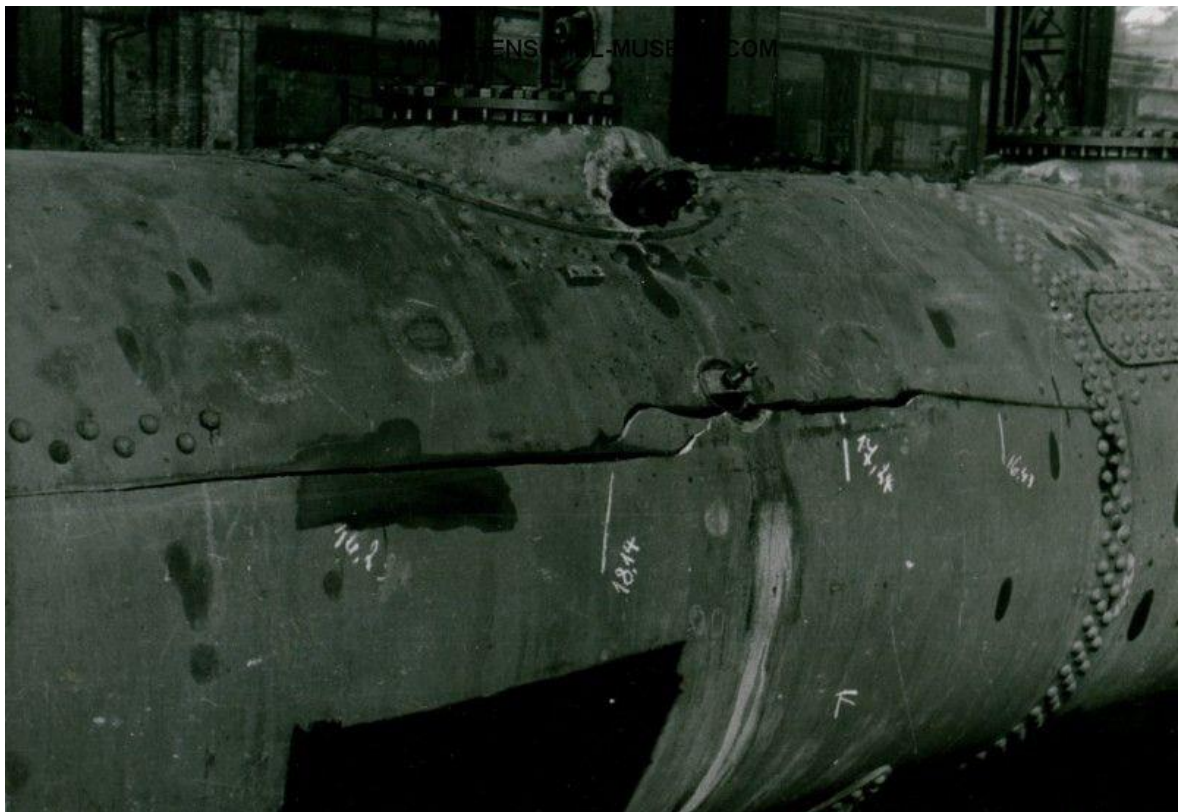


Abbildung 1: geborstener Behälter bei Prüfdruck

5. Ziel der Arbeit

Das in dieser Arbeit angestrebte Ziel ist ein Vergleich zwischen zwei Berechnungsvorschriften für unbefeuerte Druckbehälter. An einem freigewählten, fiktiven Beispiel eines Druckbehälters sollen bei stets konstanten Ausgangsbedingungen die Unterschiede zwischen DIN EN 13445: 2013-12 und den AD 2000 Regelwerk verdeutlicht werden. Hierzu wird der besagte unbefeuerte Druckbehälter mit gleichbleibender Temperatur und Druck mit jeweils einer Rechenmethode überprüft um eventuell auftretende Abweichungen in den Ergebnissen deutlich zu machen. Des Weiteren wird der Einfluss unterschiedlicher Materialien auf die Rechenergebnisse untersucht.

6. unbefeuerte Druckbehälter

Unbefeuerte Druckbehälter werden im Allgemeinen auch nur als Druckbehälter bezeichnet. Sie sind geschlossene Behälter, deren innerer Druck eine Differenz sowohl positiv als auch negativ gegenüber dem Umgebungsdruck aufweist.

Im Gegensatz zu Dampferzeugern und Rohrleitungen sind unbefeuerte Druckbehälter wie auch die Bezeichnung vermuten lässt, nicht beheizt und dienen auch nicht zum Transport von Medien. Ihr Hauptzweck gilt der stationären Speicherung von verschiedenen Medien unter ganz verschiedenen Beanspruchungen.

Beispielsweise dienen sie in Kraftwerken zur Speisewasseraufbereitung oder als Lagerbehälter für unter Druck stehende Gase.

6.1 Mantel

Ähnlich dem Kleidungsstück dient der Mantel eines Druckbehälters zur Abgrenzung zweier Stoffsysteme. Grundsätzlich unterscheidet sich hier die Kugelform vom Zylinder, welcher auch im Rechenbeispiel zur Anwendung kommt. Die meisten tragenden Bauteile im Bauwesen werden als stabartige Tragelemente betrachtet, dem gegenüber steht der Behälter als zweidimensionales Flächentragwerk.

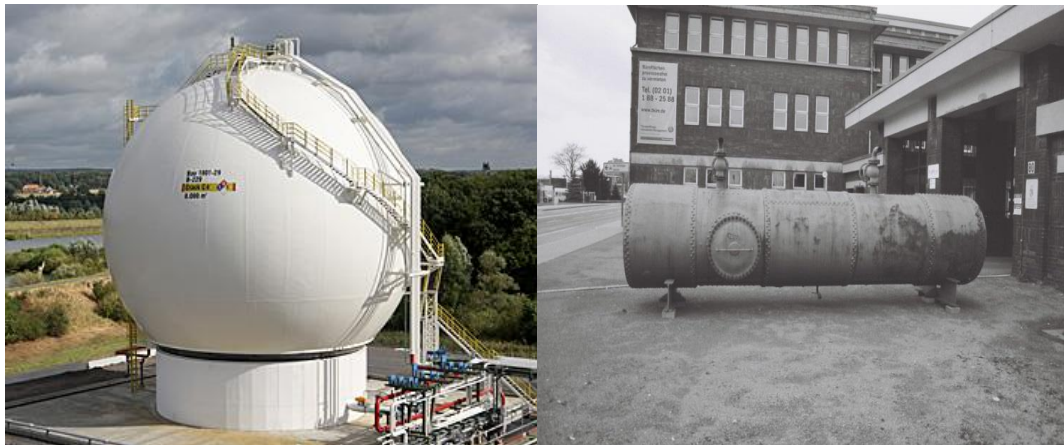


Abbildung 2: links Druckbehälter in Kugelform, rechts Druckbehälter in Zylinderform

Der Mantel wird als Schale betrachtet, die durch ihre Krümmung die, durch den Druck hervorgerufene Flächenbelastung wie eine Membran über die Normalspannungen abträgt. Biegemomente können somit im Normalfall außen vor gelassen werden und treten erst bei Störstellen im Mantel oder beim Übergang zu einem Boden auf.

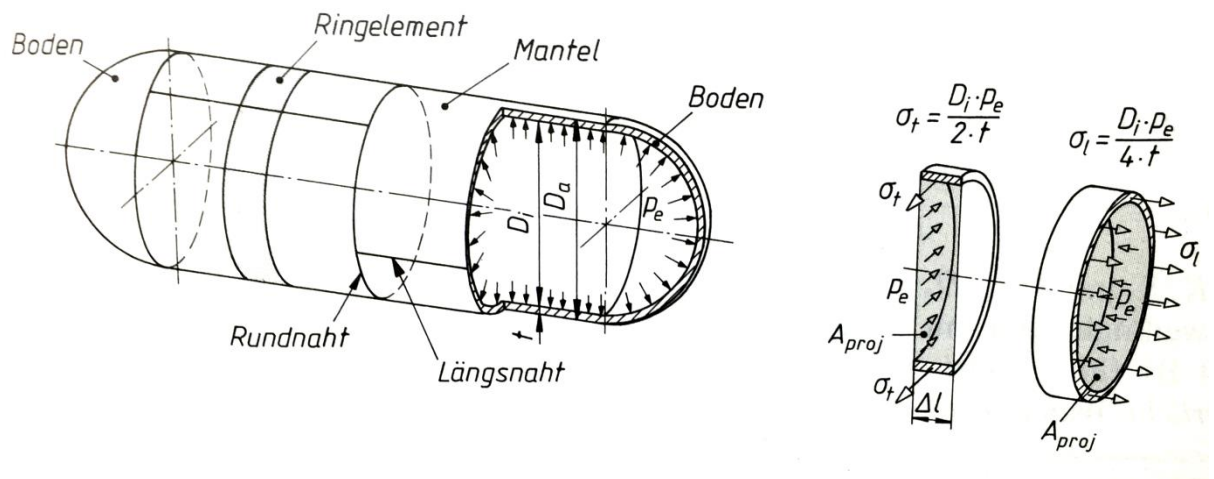


Abbildung 3: Beanspruchungen des Behältermantels

6.2 Behälterböden

Am Markt gibt es eine Vielzahl von verschiedenen Bodentypen, die unterschiedliche Berechnungsmethoden erfordern. Hierbei werden die Böden aufgrund ihrer Merkmale in zwei Hauptgruppen unterteilt.

Zum einen sind da die ebenen und platten Böden, die einseitig durch gleichmäßigen Druck belastet werden und somit eine Biegespannung erfahren. Durch eine eher ungünstige Spannungsverteilung sinkt somit auch der Grad der Effektivität in Bezug auf die Werkstoffausnutzung.

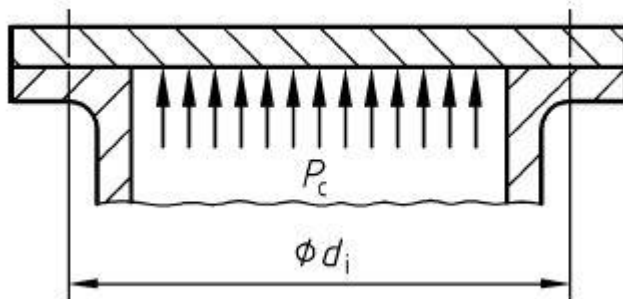


Abbildung 4: ebener Boden einer Flanschverbindung

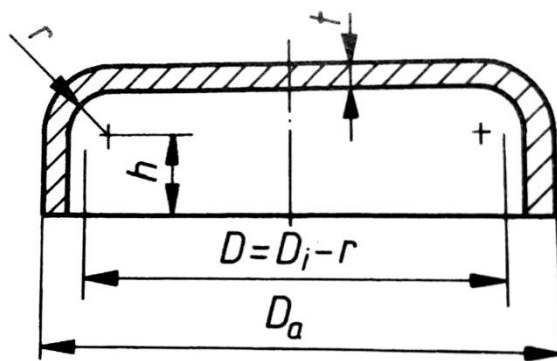


Abbildung 5: gekremter ebener Boden

Ebene Böden werden oft genutzt, wenn konstruktiv ebene Flächen gefordert werden oder auch als Rohrboden und Deckel.

Die andere Gruppe bilden die gewölbten Böden, die ihre beste Werkstoffausnutzung in Form eines Halbkugelbodens erfahren, da hier die Druckkräfte gleichmäßig und biegungsfrei abgetragen werden.

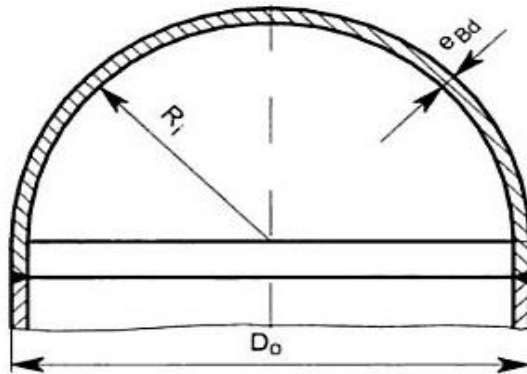
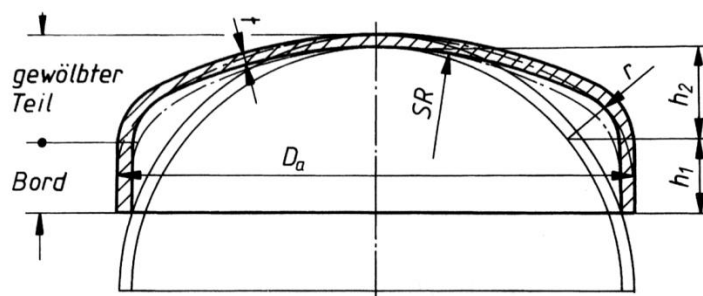


Abbildung 6: Halbkugelboden

Weitere Formen von gewölbten Böden sind der Korbbogenboden und der Klöpperboden welcher auch im Rechenbeispiel zur Anwendung kommt.

Bei diesen beiden Bodenformen liegt der größte Wert der Spannung in der Krempe und steigt mit dem Verhältnis R/D_a .

Aufgrund der ungleichmäßigen Krümmung dieser Böden wechselt die Spannung von Zug der Außenfaser im Kalotten Teil auf Biegedruck im Bereich der Krempe.



- Klöpperboden: $R = D_a$, $r = 0,1 D_a$, $h_1 \geq 3,5 t$, $h_2 = 0,1935 D_a - 0,455 t$
- - - Korbbogenboden: $R = 0,8 D_a$, $r = 0,154 D_a$, $h_1 \geq 3 t$, $h_2 = 0,255 D_a - 0,635 t$
- Halbkugelboden: $R = r = 0,5 D_i$, $h_1 = 0$

Abbildung 7: Übersicht gewölbte Böden

6.3 Ausschnitte in der Behälterwand

Ganz wie beim Kleidungsstück müssen auch bei Druckbehältern Öffnungen für die Erfüllung der jeweiligen Funktion vorgesehen werden.

Behälterwände werden vielfach durchbrochen, um beispielsweise Stutzen für die Bestückung oder Messeinrichtungen anzubringen. Mannlöcher und Besichtigungsöffnungen sind oftmals unabdingbar für den sicheren Betrieb und die damit verbundene Inspektionen des Behälterinnenraumes.

Diese als Verschwächung der Wand bezeichneten meist runden Ausschnitte machen eine entsprechende Verstärkung in diesem Bereich oft erforderlich.

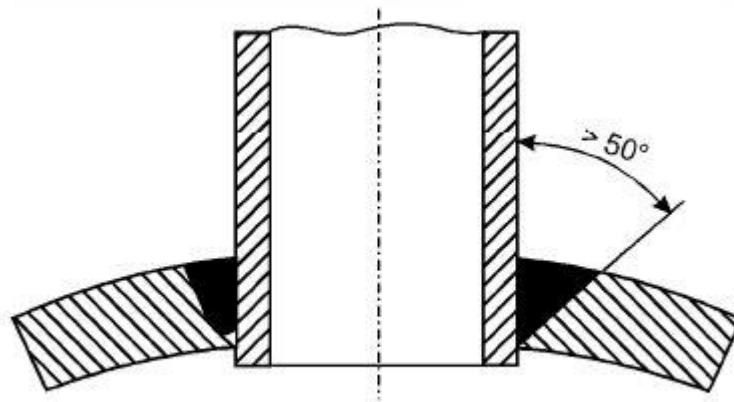


Abbildung 8: eingesetzter Stutzen

Zur Versteifung dieses durch den Ausschnitt geschwächten Bereichs im Behälter-Mantel oder Boden gibt es eine Vielzahl an Möglichkeiten.

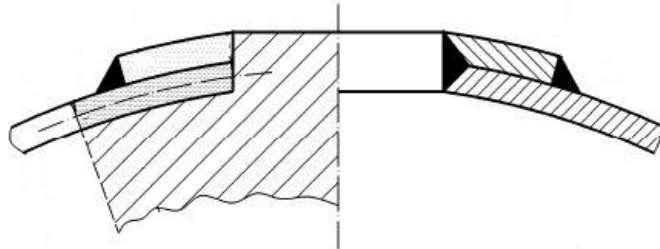


Abbildung 9: Verstärkungsscheibe

Um den Betrag der mittragenden Fläche zu erhöhen, können Versteifungsscheiben aufgesetzt oder Rohrstutzen eingesetzt werden. Scheiben und rohrförmige Verstärkungen dürfen auch gemeinsam zur Ausschnittsverstärkung herangezogen werden.

7. AD 2000 - Merkblätter

Arbeitsgemeinschaft Druckbehälter kurz AD in der Version AD 2000 ist ein Regelwerk, das als Gemeinschaftswerk zahlreicher Verbände und der deutschen Industrie getragen und fortentwickelt wird.

Im AD 2000 - Regelwerk werden alle Sicherheitsanforderungen der europäischen Druckgeräterichtlinie (DGRL) konkretisiert.

Bestehend aus verschiedenen Merkblattsammlungen bildet das AD 2000 - Regelwerk ein in sich geschlossenes System welches die Auslegung, Herstellung und Prüfung drucktragender Geräte bis ins Kleinste regelt.

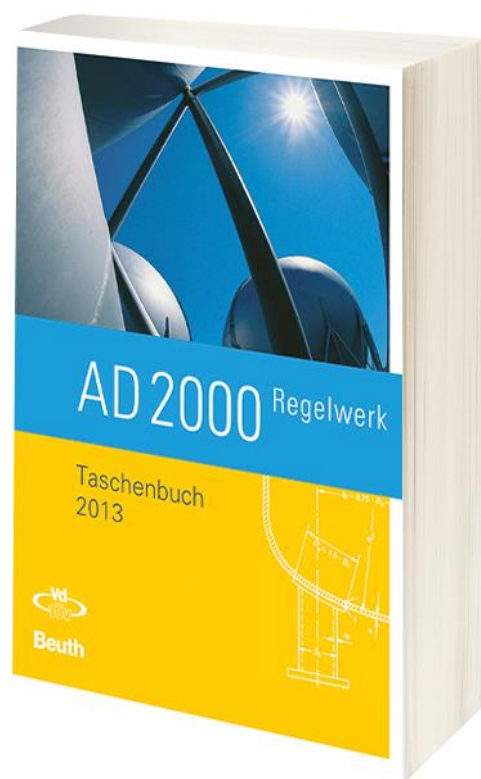


Abbildung 10: AD 2000 Taschenbuch

8. DIN EN 13445

Der Grundstein für ein einheitliches europäisches Regelwerk für Druckbehälter wurde mit Inkrafttreten der Richtlinie 97/23/EG am 29. November 1999 gelegt.

Daraus resultierend ist die harmonisierte Norm für unbefeuerte Druckbehälter in ihrer aktuellsten Version DIN EN 13445: 2012 - 12 entstanden. Die DIN EN 13445 ist eine Kombination verschiedenster nationaler Normen und Berechnungsvorschriften.

In ihr werden verschiedene Einzelkomponenten bereits bestehender nationaler Vorschriften und Richtlinien zur Berechnung der unterschiedlichen Bauteile eines Druckbehälters kombiniert. So kann es vorkommen, dass sich die Berechnung im Vergleich zu den vorhandenen nationalen Versionen z. B. AD 2000 - Merkblätter erheblich unterscheidet, wenn das betreffende Bauteil in Anlehnung an eine andere nationale Vorschrift bemessen wird.

Im Teil 3 der Norm wird die Konstruktion und somit die entscheidende Berechnung für unbefeuerte Druckbehälter behandelt.

Damit ist dieser Teil für einen Vergleich mit den AD Merkblättern der Reihe B und S geeignet.

9. angewendete Materialien

Hier folgt ein kurzer Überblick über die bei der Berechnung verwendeten Materialien.

Um die Unterschiede der beiden Berechnungsverfahren zu verdeutlichen, werden zwei verschiedene Materialien verwendet, deren Eigenschaften sich möglichst weit unterscheiden. Der ferritische Druckbehälterstahl P295GH und der austenitische Druckbehälterstahl X2CrNiN18-7. In den folgenden Tabellenauszügen aus der DIN EN 10028 werden die für die Berechnung maßgebenden Festigkeitskennwerte aufgezeigt.

Kennwerte für Druckbehälterstahl P295GH:

Stahlsorte		Erzeugnis- dicke ^{b, c} <i>t</i>	Mindest-0,2 %-Dehngrenze $R_{p0.2}$ MPa bei einer Temperatur in °C von										
Kurzname	Werkstoff- nummer		mm	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
P295GH ^d	1.0481		≤ 16	285	268	249	228	209	192	178	167	–	–
		16 < <i>t</i> ≤ 40	280	264	244	225	206	189	175	165	–	–	
		40 < <i>t</i> ≤ 60	276	259	240	221	202	186	172	162	–	–	
		60 < <i>t</i> ≤ 100	251	237	219	201	184	170	157	148	–	–	
		100 < <i>t</i> ≤ 150	227	214	198	182	167	153	142	133	–	–	
		150 < <i>t</i> ≤ 250	213	200	185	170	156	144	133	125	–	–	

Tabelle 1: Kennwerte für Mindestdehngrenze

Kennwerte für Druckbehälterstahl X2CrNiN18-7:

Stahlsorte		Mindestwert der 0,2-%-Dehngrenze $R_{p0,2}$, MPa														Mindestwert der 1,0-%-Dehngrenze $R_{p1,0}$, MPa														
Kurzname	Werkstoff-nummer	bei einer Temperatur (in °C) von																												
		50 ^a	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	50 ^a	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600					
Austenitische korrosionsbeständige Stähle																														
X2CrNiN18-7	1.4318	309	265	200	185	180	170	165	–	–	–	–	–	–	–	235	215	210	200	195	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
X2CrNi18-9	1.4307	180	147	132	118	108	100	94	89	85	81	80	–	218	181	162	147	137	127	121	116	112	109	108	–	–	–	–	–	–
X2CrNi19-11	1.4306	180	147	132	118	108	100	94	89	85	81	80	–	218	181	162	147	137	127	121	116	112	109	108	–	–	–	–	–	–
X5CrNiN19-9	1.4315	246	205	175	157	145	136	130	125	121	119	118	–	284	240	210	187	175	167	161	156	152	149	147	–	–	–	–	–	–
X2CrNiN18-10	1.4311	246	205	175	157	145	136	130	125	121	119	118	–	284	240	210	187	175	167	161	156	152	149	147	–	–	–	–	–	–
X5CrNi18-10	1.4301	190	157	142	127	118	110	104	98	95	92	90	–	228	191	172	157	145	135	129	125	122	120	120	–	–	–	–	–	–

Tabelle 2: Mindestwert Dehngrenze Austenit

Im Fortgang ist es für die Festlegung von Sicherheitsbeiwerten unabdingbar, die verwendeten Materialien in Werkstoffgruppen und daraus resultierend in Prüfgruppen nach DIN EN 13445 für Druckbehälter aus Stahl einzuordnen.

Anforderungen	Prüfgruppe ^a						
	1a	1b	2a	2b	3a	3b	4 ^{b j}
Zugelassene Werkstoffe ^g	1 bis 10	1.1, 1.2, 8.1	8.2, 9.1, 9.2, 9.3, 10	1.1, 1.2, 8.1	8.2, 9.1, 9.2, 10	1.1, 1.2, 8.1	1.1, 8.1
Umfang der zerstörungsfreien Prüfung von bestimmenden Schweißnähten ^{e h}	100 %	100 %	100-10 % ^d	100-10 % ^d	25 %	10 %	0 % ^k
Zerstörungsfreie Prüfung von anderen Schweißnähten	In Tabelle 6.6.2-1 für alle Arten von Schweißnähten festgelegt.						
Schweißnahtfaktor	1	1	1	1	0,85	0,85	0,7
Maximale zulässige Werkstoffdicke in der betreffenden Prüfgruppe	Unbegrenzt ^f	Unbegrenzt ^f	30 mm für 9.1, 9.2 16 mm für 9.3, 8.2 ⁱ , 10	50 mm für 1.1., 8.1 35 mm für 1.2	30 mm für 9.2, 9.1 16 mm für 8.2, 10	50 mm für 1.1, 8.1 30 mm für 1.2	12 mm für 1.1, 8.1
Schweißprozess	Unbegrenzt ^f	Unbegrenzt ^f	Nur vollmechanisiertes Schweißen ^c		Unbegrenzt ^f	Unbegrenzt ^f	Unbegrenzt ^f
Betriebstemperaturbereich	Unbegrenzt ^f	Unbegrenzt ^f	Unbegrenzt ^f	Unbegrenzt ^f	Unbegrenzt ^f		Begrenzt auf (– 10 bis + 300) °C für 1.1 (– 105 bis + 300) °C für 8.1

Tabelle 3: Prüfgruppen für Druckbehälter aus Stahl

10. Beschreibung des Rechenbeispiels

Beim gewählten Beispiel handelt es sich um einen unbefeuerten Speicherbehälter für Druck und temperaturbeaufschlagte Fluide mit einem Fassungsvermögen von ungefähr 13.588 Litern.

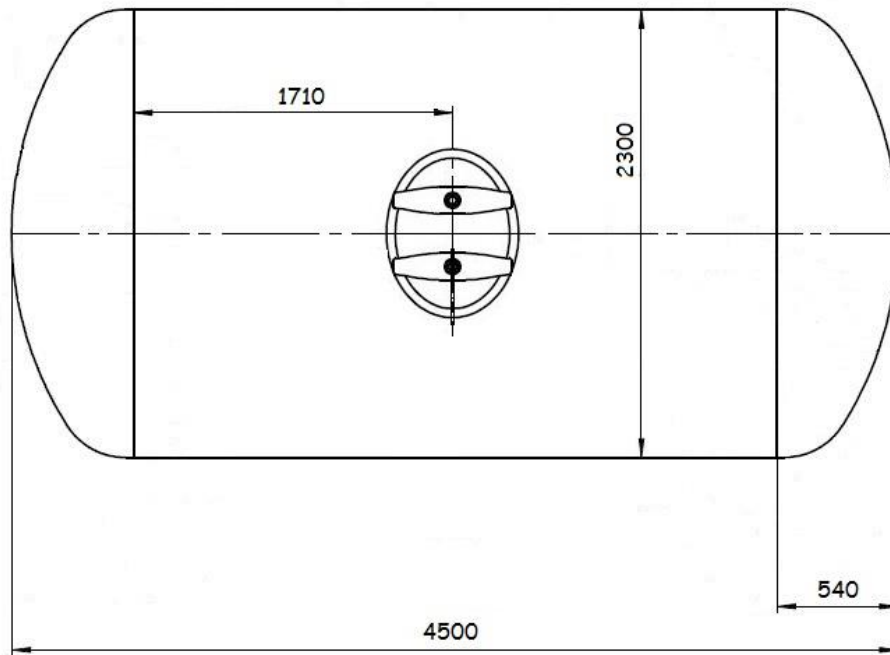


Abbildung 11: Ansichtszeichnung Rechenbeispiel

Der Behälter in zylindrischer Form besteht aus einem Zylindermantel, gefertigt aus Flacherzeugnissen in Schussbauweise, wobei besonderer Wert auf die Vermeidung von Schweißnahtkreuzungen zu legen ist. Am rechten und linken Ende des Zylindermantels befindet sich je ein Boden, ausgeführt als einteiliger Boden in Klöpperform nach DIN EN 28011, dessen Verbindung zum Mantel eine rundumlaufende voll durchgeschweißte Stumpfnah bildet.

In mitten der Schale befindet sich ein elliptischer Durchbruch für ein Mannloch, mit den Maßen $300\text{mm} \times 400\text{mm}$ ausgeführt wird. Um die Berechnungen auf einem vergleichbaren Niveau zu halten, werden keine weiteren Durchbrüche für Ausrüstungsbauteile oder Befestigungspunkte geplant.

11. Berechnung nach AD 2000 mit P295GH

Werkstoff: P295GH Werkstoffnummer 1.0481 nach DIN EN 10028-2
Flacherzeugnisse aus Druckbehälterstahl

Da die Berechnung nach dem AD 2000 - Regelwerk den Charakter eines Nachweisverfahrens aufweist, ist der Standardablauf bei der Berechnung eine zuvor aufgestellte Annahme der Bauteilauslegung zu bestätigen, oder gegebenenfalls zu widerlegen. Somit wird vorab mit Hilfe von Überschlagsformeln eine grobe Vordimensionierung der einzelnen Bauteile vorgenommen.

11.1 Behältermantel nach AD 2000 - Merkblatt B 1

Die erste Annahme gilt für die Erzeugnissdicke 16 – 40mm bei 300°C Berechnungstemperatur und Dehngrenze $R_{p0,2} = 189 \text{ N/mm}^2$ mit einer Streckgrenze $R_{eH} 290 \text{ N/mm}^2$ und Zugfestigkeit von 460-580 N/mm^2 .

Es ergibt sich die erforderliche Wanddicke des Behältermantels

$$t = \frac{D_a * p_e}{2 * \frac{K}{S} * v + p_e} + c_1 + c_2$$

Weiter ist zu beachten, dass die Behälterwand unbeheizt ist und somit die Berechnungstemperatur 300°C gleich der Betriebstemperatur ist.

K = Festigkeitskennwert bei Berechnungstemperatur $R_{p0,2} = 189 \text{ N/mm}^2$ nach Tabelle 4 DIN EN 10028-2

D_a = Außendurchmesser Zylindrischer Mantel = 2300mm

P_e = Berechnungsdruck = 25bar = 2,5Mpa = 2,5 N/mm^2

v = Faktor für Ausnutzung der zulässigen Berechnungsspannung in Schweißnähten nach AD 2000 - Merkblatt B0 und HP0 $v = 0,85$

S= Sicherheitsbeiwert nach AD 2000 - Merkblatt B0 für Walz und Schmiedestähle

$$S = 1,5$$

Werkstoff		Betrieb	Prüfdruck
1. Walz- und Schmiedestähle		1,5	1,05
2. Stahlguss		2,0	1,4

Tabelle 4: Sicherheitsbeiwerte AD-B0;2000 Tafel 2

c_1 = Zuschlag für Wanddickenunterschreitung bei Halbzeugen: warmgewalztes Stahlblech Klasse A nach DIN EN 10028-2. Herleitung und Berechnung nach DIN EN 10029 Tabelle 1 Grenzabmaße Blech Klasse A $25mm < t < 40mm$ $c_1= 0,7mm$

Nenn­dicke t	Grenzabmaße der Dicke (siehe 6.1.1)							
	Klasse A		Klasse B		Klasse C		Klasse D	
	Unteres Abmaß	Oberes Abmaß	Unteres Abmaß	Oberes Abmaß	Unteres Abmaß	Oberes Abmaß	Unteres Abmaß	Oberes Abmaß
$3 \leq t < 5$	−0,3	+0,7	−0,3	+0,7	0	+1,0	−0,5	+0,5
$5 \leq t < 8$	−0,4	+0,8	−0,3	+0,9	0	+1,2	−0,6	+0,6
$8 \leq t < 15$	−0,5	+0,9	−0,3	+1,1	0	+1,4	−0,7	+0,7
$15 \leq t < 25$	−0,6	+1,0	−0,3	+1,3	0	+1,6	−0,8	+0,8
$25 \leq t < 40$	−0,7	+1,3	−0,3	+1,7	0	+2,0	−1,0	+1,0
$40 \leq t < 80$	−0,9	+1,7	−0,3	+2,3	0	+2,6	−1,3	+1,3
$80 \leq t < 150$	−1,1	+2,1	−0,3	+2,9	0	+3,2	−1,6	+1,6
$150 \leq t < 250$	−1,2	+2,4	−0,3	+3,3	0	+3,6	−1,8	+1,8
$250 \leq t < 400$	−1,3	+3,5	−0,3	+4,5	0	+4,8	−2,4	+2,4

Die Grenzabmaße gelten nicht für durch Schleifen ausgebesserte Zonen (siehe 6.1.2)

Tabelle 5: Grenzabmaße DIN EN 10029 Tab. 1

c_2 = Abnutzungs- Korrosionszuschlag bei ferritischen Stählen $c_2 = 1,0mm$
beziehungsweise $c_2= 0$ bei $t_e > 30mm$ und austenitischen Stählen

$$t = \frac{2300mm * 2,5N/mm^2}{2 * \frac{189N/mm^2}{1,5} * 0,85 + 2,5N/mm^2} + 0,7mm + 1,0mm$$

$$t = 28,234379mm$$

Daraus ergibt sich nach Aufrundung eine ausgeführte Wanddicke von $t_e = 29,0mm$.

11.2 Behälterboden nach AD 2000 - Merkblatt B 3

Gewölbter Boden in Klöpperform nach DIN 28011 mit Prüfbescheinigung nach DIN EN 10204

Da es sich um einen einteiligen Boden handelt ist somit der Nachweis für den gesamten Boden mit der erforderlichen Wanddicke der Krempe erbracht.

$$s = \frac{D_a * p_e * \beta}{4 * \frac{K}{S} * v} + c_1 + c_2$$

Dieses Berechnungsverfahren verläuft iterativ, das heißt für die Bestimmung des Berechnungsbeiwertes β muss zunächst eine Wanddicke angenommen werden. Da der Boden im Krempenbereich ungünstiger beansprucht wird als der Mantel, kann bei der Annahme der Wandstärke ein Zuschlag aufgebracht werden. Somit komme ich vorerst zur Annahme $s = 30mm$.

K = Festigkeitskennwert bei Berechnungstemperatur $R_{p0,2} = 189 \text{ N/mm}^2$ nach Tabelle 4 DIN EN 10028-2

c_1 = unteres Abmaß in Abhängigkeit der Wanddicke s nach DIN EN 28011 Tabelle 4 $10mm < s \leq 30mm$ $c_1 = 0,5mm$

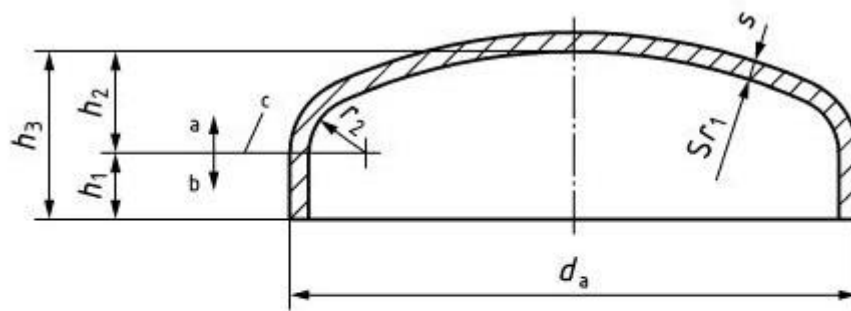
c_2 = Abnutzungs- Korrosionszuschlag bei ferritischen Stählen $c_2 = 1,0mm$ beziehungsweise $c_2 = 0$ bei $t_e > 30mm$ und austenitischen Stählen

v = Faktor für Ausnutzung der zulässigen Berechnungsspannung in Schweißnähten nach AD 2000 - Merkblatt B0 und HP0 Bei einteiligen und geschweißten Böden kann $v=1,0$ angenommen werden

D_a = Außendurchmesser zylindrischer Mantel = 2300mm

P_e = Berechnungsdruck = 25bar = 2,5Mpa = 2,5 N/mm²

S = Sicherheitsbeiwert nach AD 2000 - Merkblatt B0 für Walz und Schmiedestähle
 $S = 1,5$



Legende

- a gewölbter Teil
- b zylindrischer Bord
- c Tangentiallinie

Abbildung 12: Klöpferboden nach DIN 28011

$$S_{r1} = d_a \quad r_2 = 0,1 \cdot d_a \quad h_1 \geq 3,5s \quad h_2 = 0,1935 \cdot d_a - 0,455 \cdot s$$

Bestimmung des Berechnungsbeiwertes β mit y in den Grenzen $0,001 < y \leq 0,1$

Für die Klöpferform gilt: $\beta = 1,9 + \frac{0,0325}{y^{0,7}}$ mit $y = \frac{s - c_1 - c_2}{D_a}$

$\beta = 2,602589$ dieser Wert wird vorerst für die Waddickenberechnung des Bodens verwendet.

$$s = \frac{2300mm \cdot 2,5 \frac{N}{mm^2} \cdot 2,603}{4 \cdot \frac{189N/mm^2}{1,5} \cdot 1,0} + 0,5mm + 1,0mm$$

$s = 31,192237mm$ der ermittelte Wert wird nun für eine Neubestimmung des Berechnungsbeiwertes β verwendet.

Neubestimmung von β mit $s = 31,192237mm$

Hieraus ergibt sich ein neuer Wert von $\beta = 2,58272$, der nun wiederum in die Berechnung der Bodenwanddicke eingesetzt wird.

$$s = \frac{2300mm * 2,5 \frac{N}{mm} * 2,5827}{4 * \frac{189N/mm^2}{1,5} * 1,0} + 0,5mm + 1,0mm$$

$$s = 30,96555mm$$

Das Iterative Berechnungsverfahren wird nun an dieser Stelle beendet, da für die Veränderung des β Wertes nur noch geringfügige Unterschiede für das Berechnungsergebnis der Bodenwanddicke zu erwarten sind. Somit ist die ausgeführte Wanddicke des Bodens mit $s_e=31,0mm$ ausreichend nachgewiesen. Die zu Beginn gestellte Annahme, dass die zu erwartende Wandstärke der Krempe des Bodens größer als die des Mantels ist, wurde ebenfalls mit dem Ergebnis bestätigt.

- Bezeichnung des Bodens nach DIN 28011
- Boden DIN 28011-2300x31-VA-P295GH

11.3 Behälterausschnitt nach AD 2000 - Merkblatt B 9

Als Prinzip der Versteifung der durch das Mannloch hervorgerufenen Verschwächung des Zylindermantels dient der durchgesteckte Stutzen. Die Aufgabe des Stutzens ist es, die zur Aufnahme der durch den inneren Überdruck verursachten Spannungen beanspruchte Fläche zu vergrößern. Hierfür wird ausschließlich ein Stutzen ohne eine zusätzliche Verstärkungsscheibe eingesetzt.

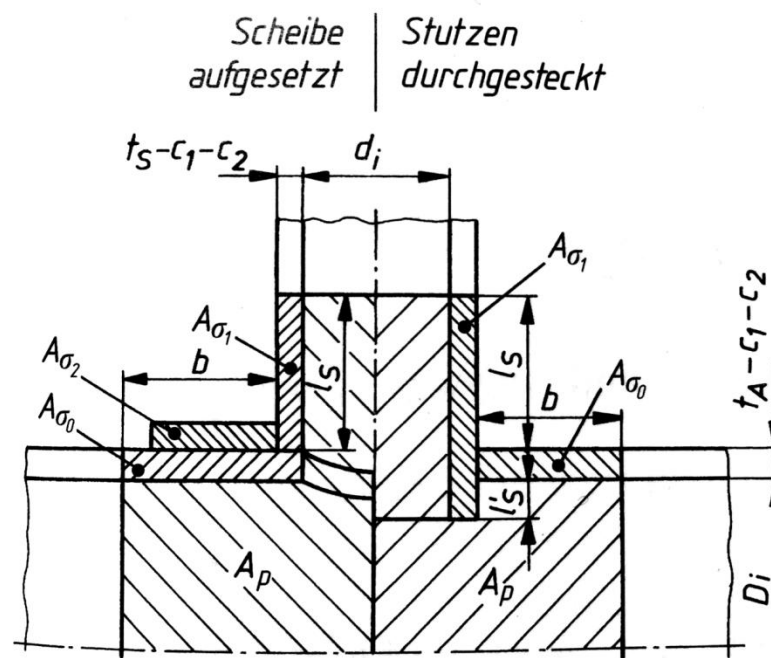


Abbildung 13: Berechnungsschema für Ausschnitte in Behältern

Für das gewählte Beispiel kommt ein Stutzen aus Blech mit den Halbzeugdimensionen 150mmx20mm aus dem Material P295GH zum Einsatz. Nun gilt es zu überprüfen, ob die gewählten Dimensionen eine ausreichende Versteifung der Fehlstelle im Behältermantel bewirken.

Für die Berechnung gilt die allgemeine Festigkeitsbedingung mit den darauf folgenden Werten.

$$\sigma_v = p_e \left(\frac{A_p}{A_\sigma} + \frac{1}{2} \right) \leq \frac{K}{S}$$

P_e = Berechnungsdruck = 25bar =2,5Mpa = 2,5 N/mm²

S = Sicherheitsbeiwert nach AD 2000 - Merkblatt B0 für Walz und Schmiedestähle
 $S=1,5$

K = Festigkeitskennwert bei Berechnungstemperatur $R_{p0,2} = 189 \text{ N/mm}^2$ nach Tabelle 4 DIN EN 10028-2

A_p = druckbelastete projizierte Fläche für zylindrische und kugelige Grundkörper

$$A_p = \left(b + t_s - c_1 - c_2 + \frac{d_i}{2} \right) * \frac{D_i}{2}$$

A_σ = tragende Querschnittsfläche aus der Summe der mittragenden Längen b und l_s

$$A_\sigma = A_{\sigma 0} + A_{\sigma 1}$$

$$A_{\sigma 0} = (t_A - c_1 - c_2) * b$$

$$A_{\sigma 1} = (l'_s + l_s + t_A) * (t_s - c_1 - c_2)$$

$$b = \sqrt{(D_i + t_A - c_1 - c_2) * (t_A - c_1 - c_2)}$$

$$l_s = 1,25 \sqrt{(d_i + t_s - c_1 - c_2) * (t_s - c_1 - c_2)}$$

Zur Erhöhung der Sicherheit gilt die Annahme, dass die druckbelastete Projektionsfläche bis zum Innendurchmesser des Mantels reicht.

c_1 = Zuschlag für Wanddickenunterschreitung bei Halbzeugen warmgewaltes Stahlblech Klasse A nach DIN EN 10028-2 Herleitung und Berechnung nach DIN EN 10029 Tabelle 1 Grenzabmaße Blech Klasse A $15\text{mm} < t < 25\text{mm}$ $c_1= 0,6\text{mm}$

c_2 = Abnutzungs- Korrosionszuschlag bei ferritischen Stählen c_2 = 1,0mm
beziehungsweise c_2 = 0 bei $t_e > 30\text{mm}$ und austenitischen Stählen

$$\sigma_v = 2,5\text{N/mm}^2 \left(\frac{467794,83\text{mm}^2}{9555,01\text{mm}^2} + \frac{1}{2} \right) \leq \frac{189\text{N/mm}^2}{1,5}$$

$$\sigma_v = 123,47\text{N/mm}^2 \leq 126\text{N/mm}^2$$

Somit gilt das Mannloch mit dem Halbzeug aus 150mm x 20mm als ausreichend versteift anzusehen.

Im Nachgang ist nun noch eine sicherheitsrelevante Berechnung der drucktragenden Teile unter Prüfdruck p' , der dem 1,43 fachen Betriebsdruck entspricht, durchzuführen. Beim Prüfdruck p' muss sich der Behälter und seine einzelnen Komponenten dem Sicherheitswert S'_{erf} stellen. Im AD 2000-Merkblatt HP30 ist eine Druckprüfung bei Raumtemperatur, jedoch mit den Festigkeitskennwert $R_{p0,2}$ bei Betriebstemperatur vorgesehen. Somit ergibt sich folgende Gleichung für den Behältermantel:

$$S' = \frac{2 * K * v}{\frac{D_a * p'}{t_e - c_1 - c_2} - p'}$$

$$S' = 1,0795 \geq S'_{erf} = 1,05$$

Somit weist der Zylindermantel auch bei Prüfdruck eine ausreichende Sicherheit auf. Analog ist dieser Vorgang auch für den Behälterboden und das Mannloch durchzuführen.

12. Berechnung nach DIN EN 13445 mit P295GH

Zu Beginn der Berechnung eines unbefeuerten Druckbehälters nach DIN EN 13445-3 steht vorerst die Frage nach der Art der Belastung. Im Punkt 5.4.2. der Norm wird die Druckbelastung vorwiegend nicht zyklischer Art mit dem Faktor $n_{eq} \leq 500$ eingeschränkt um somit einen bestimmten Verfahrensweg zu folgen. Weiter wird im Abschnitt 5.3.2 eine Klassifizierung der Belastungen und somit die Einteilung in Lastfälle vorgenommen.

12.1 Zylindermantel nach DIN EN 13445-3

e = erforderliche Wanddicke des Behältermantels mit der Formel für gegebenen Außendurchmesser nach DIN EN 13445-3

$$e = \frac{P * D_e}{2f * z + P}$$

Um eine ausführliche Ermüdungsberechnung nicht gesondert nachzuweisen, müssen die Bedingungen $e/D_e \leq 0,16$ für den Mantel und $r/D_i = 0,5$ für die Krempe eingehalten werden.

Nun erfolgt die Berechnung der für die Bestimmung der Wanddicke benötigten Werte.

D_e = Außendurchmesser der Zylinderschale = 2300mm

P = Berechnungsdruck $P= 25\text{bar} = 2,5\text{Mpa} = 2,5\text{N/mm}^2$

z = Schweißnahtfaktor der sich aus der Prüfgruppe und der Werkstoffgruppe herleitet, dessen genaue Beschreibung der DIN EN 13445-5 Abschnitt 6 zu entnehmen ist. $z = 0,85$.

z	1	0,85	0,7
Prüfgruppe	1, 2	3	4

Tabelle 6: Schweißnahtfaktoren nach DIN EN 13445-3

f = Berechnungsspannung die nach DIN EN 13445-3 Abschnitt 6.1.3 dem kleinsten Wert aus der Berechnung von f_d entspricht.

f_d = maximaler Betrag der Berechnungsspannung für normale Betriebsfälle

$$f = f_d = \min\left(\frac{R_{p0,2/T}}{1,5}; \frac{R_{m/20}}{2,4}\right)$$

$$f = f_d = \min\left(\frac{189N/mm^2}{1,5}; \frac{520N/mm^2}{2,4}\right)$$

$$f = 126N/mm^2$$

e_n = Nennwanddicke $e_n = e + c + \sigma_e$

c = Korrosionszuschlag Definition nach DIN EN 13445-3 Abschnitt 5.2.1:

„Im Rahmen der vorliegenden Europäischen Norm umfasst der Begriff ‚Korrosion‘ Erscheinungen wie Korrosion, Oxidation, Verzunderung, Abrasion, Erosion und alle sonstigen Formen von Abtrag“.

Um einen mit der Berechnung nach AD 2000-Regelwerk vergleichbaren Wert zu erhalten wird $c = 1,0\text{mm}$ angesetzt.

σ_e = Absolut Wert der negativen Toleranz der Nennwanddicke für Flacherzeugnis Klasse A nach DIN EN 10029 Tabelle 1 für $25\text{mm} < t \leq 40\text{mm}$ mit $\sigma_e = 0,7\text{mm}$

Nenn Dicke t	Grenzabmaße der Dicke (siehe 6.1.1)							
	Klasse A		Klasse B		Klasse C		Klasse D	
	Unteres Abmaß	Oberes Abmaß	Unteres Abmaß	Oberes Abmaß	Unteres Abmaß	Oberes Abmaß	Unteres Abmaß	Oberes Abmaß
$3 \leq t < 5$	-0,3	+0,7	-0,3	+0,7	0	+1,0	-0,5	+0,5
$5 \leq t < 8$	-0,4	+0,8	-0,3	+0,9	0	+1,2	-0,6	+0,6
$8 \leq t < 15$	-0,5	+0,9	-0,3	+1,1	0	+1,4	-0,7	+0,7
$15 \leq t < 25$	-0,6	+1,0	-0,3	+1,3	0	+1,6	-0,8	+0,8
$25 \leq t < 40$	-0,7	+1,3	-0,3	+1,7	0	+2,0	-1,0	+1,0
$40 \leq t < 80$	-0,9	+1,7	-0,3	+2,3	0	+2,6	-1,3	+1,3
$80 \leq t < 150$	-1,1	+2,1	-0,3	+2,9	0	+3,2	-1,6	+1,6
$150 \leq t < 250$	-1,2	+2,4	-0,3	+3,3	0	+3,6	-1,8	+1,8
$250 \leq t < 400$	-1,3	+3,5	-0,3	+4,5	0	+4,8	-2,4	+2,4
Die Grenzabmaße gelten nicht für durch Schleifen ausgebesserte Zonen (siehe 6.1.2)								

Tabelle 7: Grenzabmaße DIN EN 10029 Tab.1

$$e = \frac{2,5\text{N/mm}^2 * 2300\text{mm}}{2 * 126\text{N/mm}^2 * 0,85 + 2,5\text{N/mm}^2}$$

$$e = 26,5344\text{mm}$$

$$e/D_e = 26,53\text{mm}/2300\text{mm} = 0,011 \leq 0,16$$

Somit entfällt der Nachweis der ausführlichen Ermüdungsberechnung für den Mantel.

$$e_n = 26,5344\text{mm} + 1,0\text{mm} + 0,7\text{mm}$$

$$e_n = 28,2344\text{mm}$$

Folglich ist nun noch der Dickenzuschlag σ_e beizufügen der ein glattes Abmaß der Zylinderwanddicke hervorbringt. Dementsprechend wird eine Wandungsstärke von 29,0mm ausgeführt.

12.2 Gewölbter Boden in Klöpperform nach DIN EN 13445-3

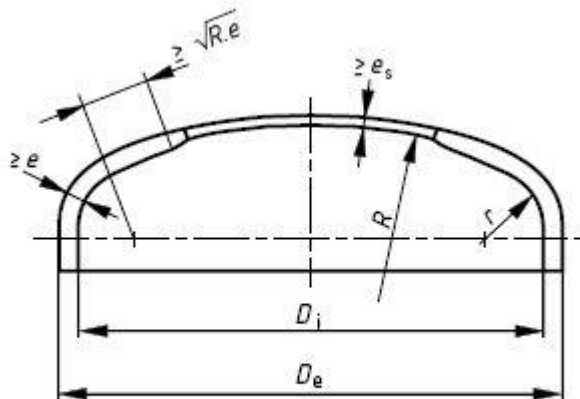


Bild 7.5-3 — Geometrie torisphärischer Böden

Abbildung 14: Geometrie Boden

Die erforderliche Wanddicke e des Bodens ist gleich dem größten Wert aus e_s , e_y und e_b wobei die Berechnung von e_b entfällt, sobald $e_y > 0,005D_i$ ist.

$$e_s = \frac{P * R}{2f * z - 0,5P}$$

$$e_y = \frac{\beta * P(0,75R + 0,2D_i)}{f}$$

$$e_b = (0,75R + 0,2D_i) \left[\frac{P}{111f_b} \left(\frac{D_i}{r} \right)^{0,825} \right]^{\left(\frac{1}{1,5} \right)}$$

Für die Geometrie eines Klöpperbodens sind folgende Bedingungen einzuhalten $R/D_e = 1,0$ und $r/D_e = 0,1$.

z = Schweißnahtfaktor der nach DIN EN 13445-3 für einteilige Boden $z = 1,0$

R = Innenradius im Mittelbereich eines torisphärischen Bodens $R = D_e = 2300\text{mm}$

D_i = Innendurchmesser des zylindrischen Bordes $D_i = D_e - 2 * e_n = 2242\text{mm}$

D_e = Außendurchmesser des zylindrischen Bordes

P = Berechnungsdruck $P = 25\text{bar} = 2,5\text{Mpa} = 2,5\text{N/mm}^2$

f = Berechnungsspannung die nach DIN EN 13445-3 Abschnitt 6.1.3 dem kleinsten Wert aus der Berechnung von f_d entspricht. $f = 126\text{N/mm}^2$

e_b = erforderliche Wanddicke der Kreme zur Verhinderung plastischen Beulens

e_s = Erforderliche Wanddicke des Bodens zur Begrenzung der Membranspannung in der Mitte

e_y = Erforderliche Wanddicke in der Kreme zur Verhinderung achssymmetrischen Fließens

β = Berechnungsbeiwert ermittelt aus Bild 7.5-1 der DIN EN 13445-3 welcher in die Berechnung einfließt. Hierbei wird vorerst zur Bestimmung des Wertes eine Wanddicke angenommen, die in diesem Fall der des Zylindermantels entspricht.

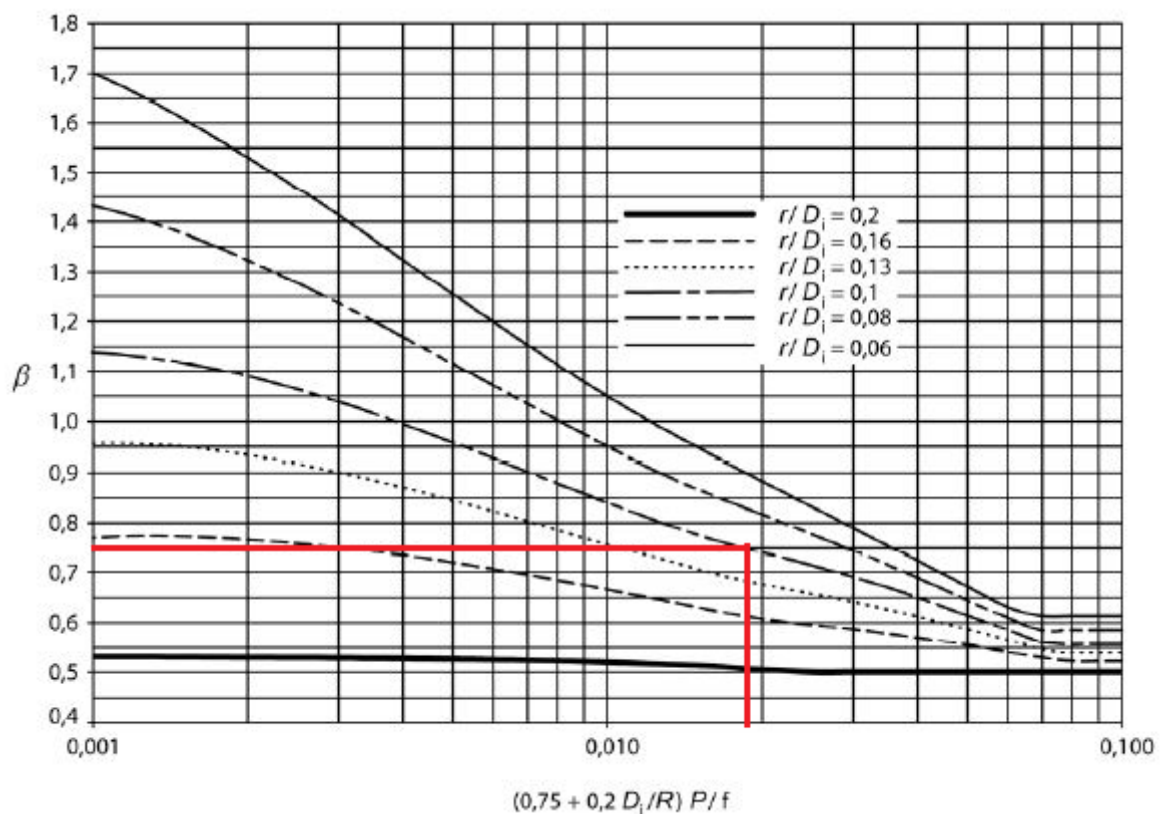


Abbildung 15: Berechnungsbeiwert $\beta = 0,75$ für Auslegung

Bestimmung von β für die Auslegung des Klöpperbodens

$$r/D_i = 0,102 \approx 0,1$$

$$(0,75 + 0,2D_i/R) * P/f = 0,01875$$

Daraus resultiert ein Wert für $\beta = 0,75$

Mit den vorbereiteten Werten kann nun die Berechnung erfolgen, um mit dem Größtwert aus e_s , e_y und e_b die Berechnungswanddicke für den Boden zu erhalten.

$$e_s = \frac{2,5N/mm^2 * 2300mm}{2 * 126N/mm^2 * 1,0 - 0,5 * 2,5N/mm^2}$$

$$e_s = 22,9312mm$$

$$e_y = \frac{0,75 * 2,5N/mm^2(0,75 * 2300mm + 0,2 * 2242mm)}{126N/mm^2}$$

$$e_y = 32,3423mm$$

$$e_y \geq 0,005 * D_i$$

$32,3423mm \geq 11,21mm$, damit entfällt die Berechnung von e_b und $e_{Boden} = e_y$ ergibt sich zu $32,3423mm$.

Mit den folgenden Zuschlägen für Korrosion $c=1,0mm$ e_{ex} als Aufrundungszuschlag und σ_e für die Negativ-Toleranz aus DIN 28011 mit $0,8mm$ ergibt sich ein Wert $e_n = 35mm$ für den Boden. Mit den hier ermittelten Werten ist nun ein weiterer Rechengang zur sogenannten „Nachberechnung“ des Bodens von Nöten. Dieser wird im Punkt 7.5.3.3 der DIN EN 13445-3 beschrieben und fordert eine Umstellung der Gleichungen hin zum Berechnungsdruck.

Der höchste zulässige Berechnungsdruck P_{max} ist demzufolge gleich dem niedrigsten Wert von P_s , P_y wobei P_b entfällt wenn $e_a > 0,005D_i$ ist. In diesem Verhältnis verbirgt sich der Nachweis auf plastisches Krepfenbeulen.

D_i wird nun auch mit dem zuvor errechneten Werten ermittelt und ist somit 2230mm.

$$P_s = \frac{2f * z * e_a}{R + 0,5 * e_a}$$

$$P_y = \frac{f * e_a}{\beta * (0,75R + 0,2D_i)}$$

$$P_b = 111f_b \left(\frac{e_a}{0,75R + 0,2D_i} \right)^{1,5} * \left(\frac{r}{D_i} \right)^{0,825}$$

Der nun auch neu zu ermittelnde Wert für β ist aus Bild 7.5-2 und den Gleichungen 7.5.3.5 aus der DIN EN 13445-3 herzuleiten.

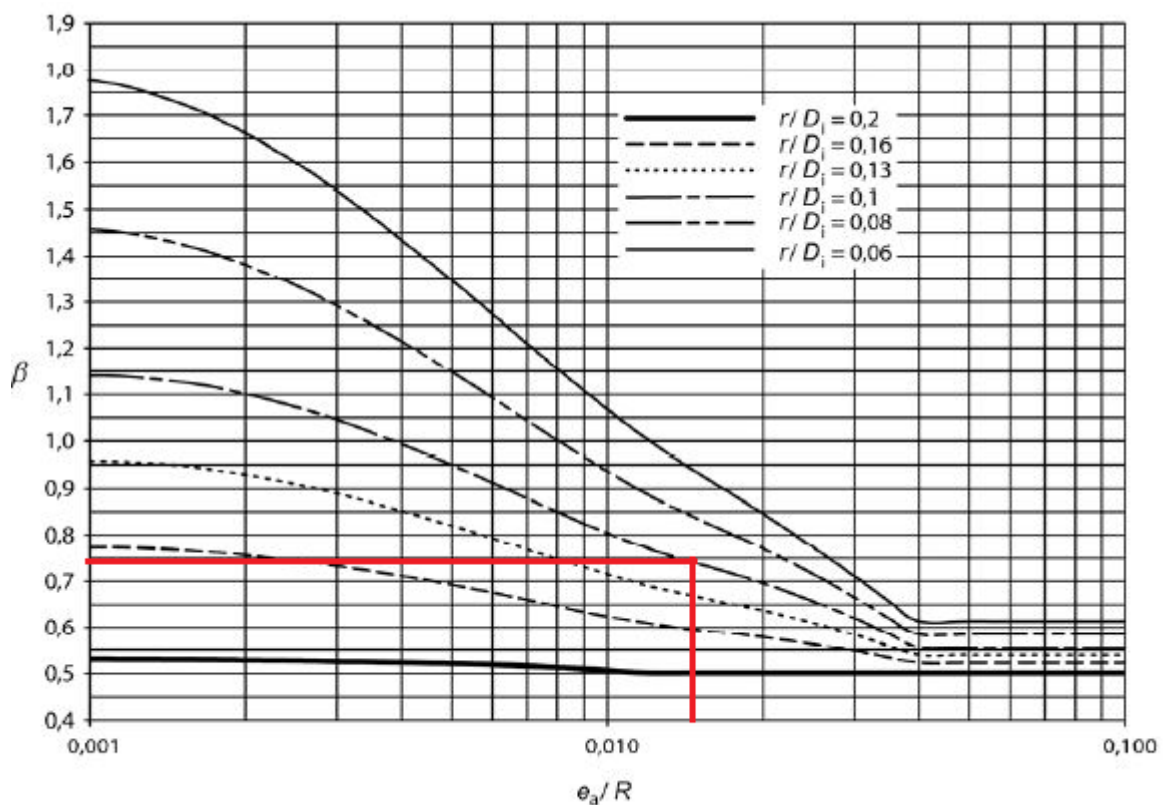


Abbildung 16: Berechnungsbeiwert $\beta = 0,74$ für Nachberechnung

$$e_a/R = 0,01443 \quad r/D_i = 0,103 \approx 0,1$$

Der neue Wert für β ergibt sich zu 0,74 .

$e_a = e_{min} - c = 33,2mm > 0,005 * D_i$ mit 11,15mm. Somit entfällt die Berechnung für P_b .

$$P_s = \frac{2 * 126N/mm^2 * 1,0 * 33,2mm}{2300mm + 0,5 * 33,2mm}$$

$$P_s = 3,6115N/mm^2$$

$$P_y = \frac{126N/mm^2 * 33,2mm}{0,74 * (0,75 * 2300mm + 0,2 * 2230mm)}$$

$$P_y = 2,6038N/mm^2$$

P_y ist der maßgebende Wert, da dieser der Kleinste der beiden ist und somit für die Nachweisführung verwendet wird.

$$P_{max} = P_y > P$$

$$2,6038N/mm^2 > 2,5N/mm^2$$

12.3 Ausschnitt mit Verstärkungsring nach DIN EN 13445-3

Hier folgt nun die Berechnung/Dimensionierung des Mannloches in Form eines elliptischen oder länglich runden Ausschnittes mit der Einschweißung einer ringförmigen Verstärkung. Die Verfahren zur Berechnung werden der DIN EN 13445-3 Abschnitt 9 entnommen. Im Punkt 9.4.2 der Norm wird auf die Schätzung der Abmessungen des Stutzens hingewiesen, wodurch der Beschluss gefasst, die einzuschweißende ringförmige Verstärkung aus artgleichem Material wie der Behältermantel und der Boden zu fertigen, mit den Abmaßen 150mm x 25mm.

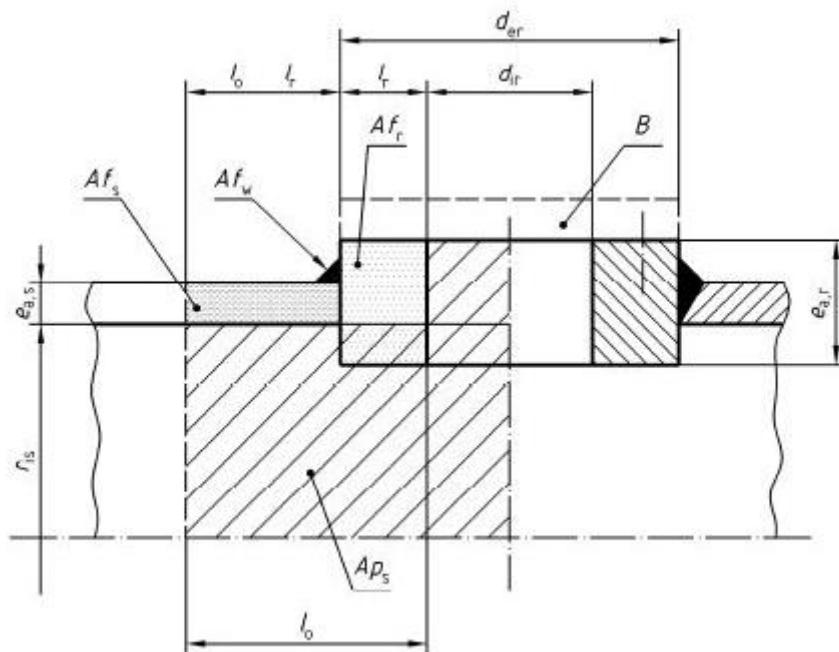


Abbildung 17: Einzelausschnitt mit Verstärkungsring

Auf Grund der Annahme das Mannloch als Einzelausschnitt zu betrachten, sind vorab gewisse Abmaße und Bedingungen zu überprüfen. Hierfür wird die Bedingung $l_b \geq a_1 + a_2 + l_{s01} + l_{s02}$ aufgestellt, die sich mit den Abstand zur nächsten Störstelle in der Behälterwand beschäftigt. Auf Grund der vorliegenden Abmaße des Rechenbeispiels ist kein weiterer Durchbruch der Behälterwand im Bereich der Zylinderschale geplant und somit entfallen die Werte für a_2 und l_{s02} .

l_b = Aus der Schale herausragende Länge des Stutzens

a_1, a_2 = Werte für a auf der Stegseite des Ausschnitts Bild 9.6-2 DIN EN 13445-3

l_{s01}, l_{s02} = Zur Ausschnittverstärkung anrechenbare maximale Länge einer Schale, gemessen am mittleren Krümmungsradius der Schale.

Als nächstliegende Unregelmäßigkeit im Spannungsverlauf des Behälters ist die Kreppe der Böden zu betrachten, deren Abstand zu beiden Seiten gleich ist.

$$P_{max} = \frac{(Af_s + Af_w) * f_s + Af_b * f_{ob} + Af_p * f_{op}}{(Ap_s + Ap_b) + 0,5 * (Af_s + Af_w + Af_b + Af_p)}$$

r_{is} = Innerer Krümmungsradius der Schale im Ausschnittmittelpunkt

$$r_{is} = \frac{D_e}{2} - e_{as} = 1571mm$$

$e_{c,s}$ = ist nach DIN EN 13445-3 Abschnitt 9.3.2 $e_{a,s}$ gleich zu setzen und beträgt demzufolge 29,0mm

Af_w = Querschnittsfläche der Schweißnaht, diese ist als voll anzunehmen, da eine völlige Durchschweißung vorgesehen ist.

Af_s = Querschnittsfläche der Schale $l'_s * e_{c,s} = 6504,54mm^2$

Af_b = Querschnittsfläche des Stutzens = 3750mm²

f_s = Berechnungsspannung der Schale mit 126N/mm²

f_{ob} = reduzierte Spannung des Stutzens mit 126N/mm² nach Abschnitt 9.5-8 DIN EN 13445-3

Ap_s = druckbelastete Fläche der Schale mit 466762,76mm²

A_{p_b} = druckbelastete Fläche des Stutzens mit 18275mm^2

l_s = Länge der Schale vom Rand eines Ausschnittes oder vom Außendurchmesser eines Stutzens bis zu einer Störstelle in der Schale.

$$P_{max} = \frac{(6504,54\text{mm}^2 + 0) * 126\text{N/mm}^2 + 3750\text{mm}^2 * 126\text{N/mm}^2 + 0 * 0}{(466762,76\text{mm}^2 + 18275\text{mm}^2) + 0,5 * (6504,57\text{mm}^2 + 0 + 3750\text{mm}^2 + 0)}$$

$$P_{max} \geq P$$

$$2,636\text{N/mm}^2 \geq 2,5\text{N/mm}^2$$

Somit sind die Festigkeitsbedingungen für das Mannloch erfüllt.

13. Berechnung nach AD 2000 mit X2CrNiN18-7

Werkstoff: X2CrNiN18-7 Werkstoffnummer 1.4318 Flacherzeugnis nach DIN EN 10028-7.

Um den Effekt eines anderen Grundwerkstoffes auf die Berechnungsergebnisse zu verdeutlichen, wird nun das bekannte Beispiel mit einem austenitischen Werkstoff berechnet. Im Gegensatz zur Berechnung eines unbefeuerten Druckbehälters aus ferritischen Stahl sind hier die Vorschriften des AD 2000-Merkblatt B1 für austenitische Werkstoffe zu beachten. Wobei der wesentlichste Unterschied in der Verwendung der $R_{p1,0/T}$ Dehngrenze liegt.

Stahlsorte		Mindestwert der 0,2%-Dehngrenze $R_{p0,2}$, MPa														Mindestwert der 1,0%-Dehngrenze $R_{p1,0}$, MPa													
Kurzname	Werkstoffnummer	bei einer Temperatur (in °C) von																											
		50 ^a	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	50 ^a	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600				
Austenitische korrosionsbeständige Stähle																													
X2CrNiN18-7	1.4318	309	285	200	185	180	170	165	–	–	–	–	–	–	–	235	215	210	200	195	–	–	–	–	–				
X2CrNi18-9	1.4307	180	147	132	118	108	100	94	89	85	81	80	–	218	181	162	147	137	127	121	116	112	109	108	–				
X2CrNi19-11	1.4306	180	147	132	118	108	100	94	89	85	81	80	–	218	181	162	147	137	127	121	116	112	109	108	–				
X5CrNiN19-9	1.4315	246	205	175	157	145	136	130	125	121	119	118	–	284	240	210	187	175	167	161	156	152	149	147	–				
X2CrNiN18-10	1.4311	246	205	175	157	145	136	130	125	121	119	118	–	284	240	210	187	175	167	161	156	152	149	147	–				

Tabelle 8: Mindestwerte Dehngrenze für austenitische Werkstoffe

13.1 Behältermantel nach AD 2000-Merkblatt B 1

$$t = \frac{D_a * p_e}{2 * \frac{K}{S} * v + p_e} + c_1 + c_2$$

K = Festigkeitskennwert bei Berechnungstemperatur $R_{p1,0/T} = 200 \text{ N/mm}^2$ nach Tabelle 13 DIN EN 10028-7 bei Berechnungstemperatur 300°C

D_a = Außendurchmesser zylindrischer Mantel = 2300mm

p_e = Berechnungsdruck = 25bar = 2,5Mpa = 2,5 N/mm²

v = Faktor für Ausnutzung der zulässigen Berechnungsspannung in Schweißnähten nach AD 2000-Merkblatt B0 und HP0 $v= 0,85$

S = Sicherheitsbeiwert nach AD 2000-Merkblatt B0 für Walz und Schmiedestähle $S=1,5$

Werkstoff		Betrieb	Prüfdruck
1. Walz- und Schmiedestähle		1,5	1,05
2. Stahlguss		2,0	1,4

Tabelle 9: Sicherheitsbeiwerte AD-B0; 2000 Tafel 2

c_1 = Zuschlag für Wanddickenunterschreitung bei Halbzeugen warmgewalztes Stahlblech Klasse A nach DIN EN 10028-2 Herleitung und Berechnung nach DIN EN 10029 Tabelle 1 Grenzabmaße Blech Klasse A 25mm < t < 40mm $c_1= 0,7\text{mm}$

Nenn Dicke t	Grenzabmaße der Dicke (siehe 6.1.1)							
	Klasse A		Klasse B		Klasse C		Klasse D	
	Unteres Abmaß	Oberes Abmaß	Unteres Abmaß	Oberes Abmaß	Unteres Abmaß	Oberes Abmaß	Unteres Abmaß	Oberes Abmaß
$3 \leq t < 5$	-0,3	+0,7	-0,3	+0,7	0	+1,0	-0,5	+0,5
$5 \leq t < 8$	-0,4	+0,8	-0,3	+0,9	0	+1,2	-0,6	+0,6
$8 \leq t < 15$	-0,5	+0,9	-0,3	+1,1	0	+1,4	-0,7	+0,7
$15 \leq t < 25$	-0,6	+1,0	-0,3	+1,3	0	+1,6	-0,8	+0,8
$25 \leq t < 40$	-0,7	+1,3	-0,3	+1,7	0	+2,0	-1,0	+1,0
$40 \leq t < 80$	-0,9	+1,7	-0,3	+2,3	0	+2,6	-1,3	+1,3
$80 \leq t < 150$	-1,1	+2,1	-0,3	+2,9	0	+3,2	-1,6	+1,6
$150 \leq t < 250$	-1,2	+2,4	-0,3	+3,3	0	+3,6	-1,8	+1,8
$250 \leq t < 400$	-1,3	+3,5	-0,3	+4,5	0	+4,8	-2,4	+2,4
Die Grenzabmaße gelten nicht für durch Schleifen ausgebesserte Zonen (siehe 6.1.2)								

Tabelle 10: Grenzabmaße DIN EN 10029 Tab.1

c_2 = Abnutzungs - Korrosionszuschlag $c_2= 0$ bei $t_e > 30\text{mm}$ und austenitischen Stählen

Um das AD 2000-Merkblatt B1 anwenden zu können, gilt es ein bestimmtes Wanddickenverhältnis einzuhalten, welches eine Abgrenzung zwischen dünnwandigen und dickwandigen Behältern bildet. Grund hierfür ist die Tatsache, dass die im AD 2000 - Merkblatt B1 enthaltenen Berechnungsvorschriften nur bei dünnwandigen unbefeuerten Druckbehältern zur Anwendung kommen dürfen. Aus dem Verhältnis $D_a/D_i \leq 1,2$ ergibt sich eine maximale Wandungsdicke von 191,6mm, die mit Sicherheit nicht überschritten wird, und somit die Anwendbarkeit des AD 2000 - Merkblatt B1 erlaubt.

$$t = \frac{2300\text{mm} * 2,5\text{N/mm}^2}{2 * \frac{200\text{N/mm}^2}{1,5} * 0,85 + 2,5\text{N/mm}^2} + 0,7\text{mm} + 0,0\text{mm}$$

$$t = 25,7909\text{mm}$$

Daraus ergibt sich eine ausgeführte Wanddicke von $t_e= 26,0\text{mm}$ und ein Verhältnis $D_a/D_i \leq 1,2 = 1,023 \leq 1,2$. Somit ist der Behälter als dünnwandig anzusehen.

13.2 Behälterboden nach AD 2000-Merkblatt B 3

Nachgewiesen wird ein gewölbter Boden in Klöpperform nach DIN 28011 mit Prüfbescheinigung nach DIN EN 10204.

Erforderliche Wanddicke der Krempe, da es sich um einen einteiligen Boden handelt, ist somit der Nachweis für den gesamten Boden erbracht.

$$s = \frac{D_a * p_e * \beta}{4 * \frac{K}{S} * v} + c_1 + c_2$$

Dieses Berechnungsverfahren verläuft iterativ, das heißt für die Bestimmung des Berechnungsbeiwertes β muss zunächst eine Wanddicke angenommen werden. Da der Boden im Krempenbereich ungünstiger beansprucht wird als der Mantel, kann bei der Annahme der Wandstärke ein Zuschlag aufgebracht werden. Somit steht vorerst die Annahme $s=26\text{mm}$.

K = Festigkeitskennwert bei Berechnungstemperatur $R_{p1,0/T} = 200 \text{ N/mm}^2$ nach Tabelle 13 DIN EN 10028-7

c_1 = unteres Abmaß in Abhängigkeit der Wanddicke s nach DIN EN 28011 Tabelle 4 $30\text{mm} < s \leq 50\text{mm}$ $c_1 = 0,8\text{mm}$

c_2 = Abnutzungs- und Korrosionszuschlag $c_2 = 0$ bei $t_e > 30\text{mm}$ und austenitischen Stählen

v = Faktor für Ausnutzung der zulässigen Berechnungsspannung in Schweißnähten nach AD 2000 - Merkblatt B0 und HP0. Bei einteiligen und geschweißten Böden kann $v=1,0$ angenommen werden.

D_a = Außendurchmesser zylindrischer Mantel = 2300mm

P_e = Berechnungsdruck = $25\text{bar} = 2,5\text{Mpa} = 2,5 \text{ N/mm}^2$

S = Sicherheitsbeiwert nach AD 2000 - Merkblatt B0 für Walz- und Schmiedestähle $S=1,5$

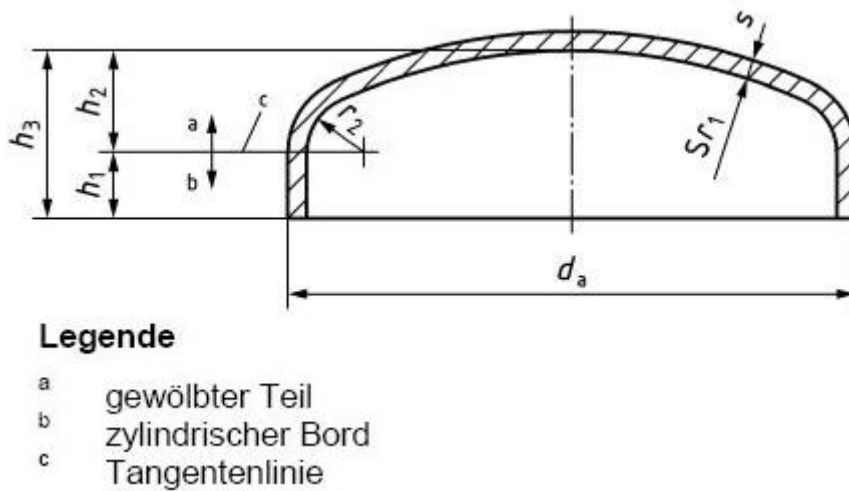


Abbildung 18: Klörperboden Nach DIN 28011

$$S_{r1} = d_a \quad r_2 = 0,1 \cdot d_a \quad h_1 \geq 3,5s \quad h_2 = 0,1935 \cdot d_a - 0,455 \cdot s$$

Bestimmung des Berechnungsbeiwertes β mit y in den Grenzen $0,001 < y \leq 0,1$

Für die Klörperform gilt: $\beta = 1,9 + \frac{0,0325}{y^{0,7}}$ mit $y = \frac{s - c_1 - c_2}{D_a}$

$\beta = 2,66579$ Dieser Wert wird vorerst für die Wanddickenberechnung des Bodens verwendet.

$$s = \frac{2300mm \cdot 2,5 \frac{N}{mm^2} \cdot 2,66579}{4 \cdot \frac{200N/mm^2}{1,5} \cdot 1,0} + 0,8mm + 0,0mm$$

$$s = 29,54060mm$$

Der so ermittelte Wert wird nun für eine Neubestimmung des Berechnungsbeiwertes β verwendet.

Neubestimmung von β mit $s = 29,54060mm$

Hieraus ergibt sich ein neuer Wert von $\beta = 2,59847$, der nun wiederum in die Berechnung der Bodenwanddicke eingesetzt wird.

$$s = \frac{2300mm * 2,5 \frac{N}{mm^2} * 2,59847}{4 * \frac{200N/mm^2}{1,5} * 1,0} + 0,8mm + 0,0mm$$

$$s = 28,81472mm$$

Das iterative Berechnungsverfahren wird nun an dieser Stelle beendet, da für die Veränderung des β Wertes nur noch geringfügige Unterschiede am Berechnungsergebnis für die Bodenwanddicke zu erwarten sind. Somit ist die letztendlich ausgeführte Wanddicke des Bodens mit $s_e = 29,0mm$ ausreichend nachgewiesen. Die zu Beginn gestellte Annahme, dass die zu erwartende Wandstärke der Krempe des Bodens größer als die des Mantels ist, wurde ebenfalls mit dem Ergebnis bestätigt.

- Bezeichnung des Bodens nach DIN 28011
- Boden DIN 28011-2300x29-VA-X2CrNiN18-7

13.3 Behälterausschnitt nach AD 2000-Merkblatt B 9

Als Prinzip der Versteifung der durch das Mannloch hervorgerufenen Verschwächung des Zylindermantels dient der durchgesteckte Stutzen. Die Aufgabe des Stutzens ist es, die zur Aufnahme der durch den inneren Überdruck verursachten Spannungen beanspruchte Fläche zu vergrößern. Hierfür wird ausschließlich ein Stutzen ohne eine zusätzliche Verstärkungsscheibe eingesetzt. Für das gewählte Beispiel kommt ein Stutzen aus Blech mit den Halbzeug Dimensionen 150mmx20mm und aus dem Material X2CrNiN18-7 zum Einsatz. Nun gilt es zu überprüfen ob die gewählten Dimensionen eine ausreichende Versteifung der Fehlstelle im Behältermantel erzielen.

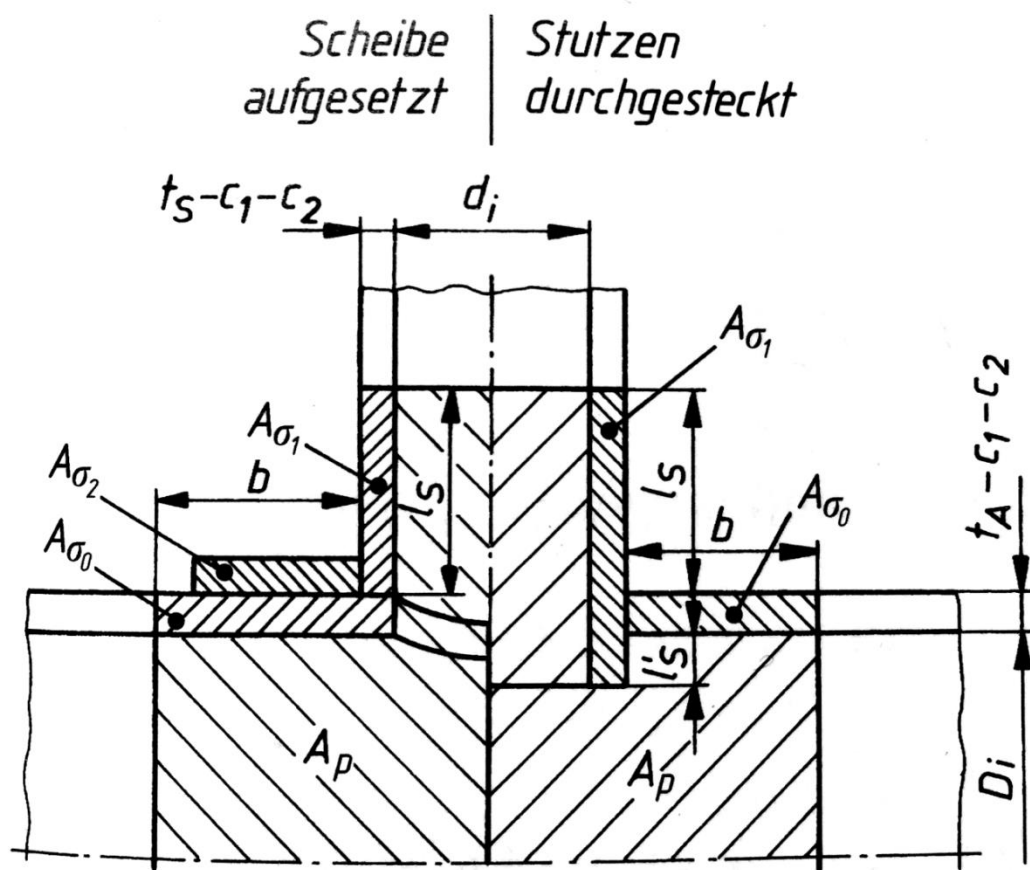


Abbildung 19: Berechnungsschema für Ausschnitte in Behältern

Für die Berechnung gilt die allgemeine Festigkeitsbedingung σ_v mit den darauf folgenden Werten.

$$\sigma_v = p_e \left(\frac{A_p}{A_\sigma} + \frac{1}{2} \right) \leq \frac{K}{S}$$

P_e = Berechnungsdruck = 25bar =2,5Mpa = 2,5 N/mm²

S = Sicherheitsbeiwert nach AD 2000 - Merkblatt B0 für Walz- und Schmiedestähle
 $S=1,5$

K = Festigkeitskennwert bei Berechnungstemperatur $R_{p1,0/T} = 200$ N/mm² nach Tabelle 13 DIN EN 10028-7

A_p = druckbelastete projizierte Fläche für zylindrische und kugelige Grundkörper

$$A_p = \left(b + t_s - c_1 - c_2 + \frac{d_i}{2} \right) * \frac{D_i}{2}$$

A_σ = tragende Querschnittsfläche aus der Summe der mittragenden Längen b und l_s

$$A_\sigma = A_{\sigma 0} + A_{\sigma 1}$$

$$A_{\sigma 0} = (t_A - c_1 - c_2) * b$$

$$A_{\sigma 1} = (l'_s + l_s + t_A) * (t_s - c_1 - c_2)$$

$$b = \sqrt{(D_i + t_A - c_1 - c_2) * (t_A - c_1 - c_2)}$$

$$l_s = 1,25 \sqrt{(d_i + t_s - c_1 - c_2) * (t_s - c_1 - c_2)}$$

Zur Erhöhung der Sicherheit gilt die Annahme, dass die druckbelastete Projektionsfläche bis zum Innendurchmesser des Mantels reicht.

c_1 = Zuschlag für Wanddickenunterschreitung bei Halbzeugen aus warmgewalzten Stahlblech Klasse A nach DIN EN 10028-2. Herleitung und Berechnung nach DIN EN 10029 Tabelle 1: Grenzabmaße Blech Klasse A 15mm < t < 25mm $c_1 = 0,6$ mm

c_2 = Abnutzungs- Korrosionszuschlag $c_2 = 0$ bei $t_e > 30$ mm und austenitischen Stählen

Berechnung der allgemeinen Festigkeitsbedingungen mit den ermittelten Werten.

$$\sigma_v = 2,5N/mm^2 \left(\frac{459201,32mm^2}{8941,42mm^2} + \frac{1}{2} \right) \leq \frac{200N/mm^2}{1,5}$$

$$\sigma_v = 129,64N/mm^2 \leq 133,3N/mm^2$$

Somit gilt das Mannloch mit dem Halbzeug aus 150mm x 20mm als ausreichend versteift anzusehen.

Im Nachgang ist nun noch eine sicherheitsrelevante Berechnung der drucktragenden Teile unter Prüfdruck p' der dem 1,43 fachen Betriebsdruck entspricht durchzuführen. Beim Prüfdruck p' muss sich der Behälter und seine einzelnen Komponenten dem Sicherheitswert S'_{erf} stellen. Im AD 2000 - Merkblatt HP30 ist eine Druckprüfung bei Raumtemperatur, jedoch mit den Festigkeitskennwert $R_{p0,2}$ bei Betriebstemperatur vorgesehen. Es ergibt sich folgende Gleichung für den Behältermantel:

$$S' = \frac{2 * K * v}{\frac{D_a * p'}{t_e - c_1 - c_2} - p'}$$

$$S' = 1,949 \geq S'_{erf} = 1,05$$

Somit weist der Zylindermantel auch bei Prüfdruck eine ausreichende Sicherheit auf. Analog ist dieser Vorgang auch für den Behälterboden und das Mannloch durchzuführen.

14. Berechnung nach DIN EN 13445 mit X2CrNiN18-7

Mit gleichbleibenden Ausgangsbedingungen, jedoch dem Werkstoff X2CrNiN18-7 der Werkstoffgruppe 8.1 wird nun hier eine Berechnung nach DIN EN 13445-3 durchgeführt.

14.1 Zylindermantel nach DIN EN 13445-3

e =Erforderliche Wanddicke des Behältermantels mit der Formel für gegebenen Außendurchmesser nach DIN EN 13445-3

$$e = \frac{P * D_e}{2f * z + P}$$

Um eine ausführliche Ermüdungsberechnung nicht gesondert nachzuweisen, müssen die Bedingungen $e/D_e \leq 0,16$ für den Mantel und $r/D_i = 0,5$ für die Krempe eingehalten werden.

Nun erfolgt die Herleitung und Berechnung der für die Bestimmung der Wanddicke benötigten Werte.

D_e = Außendurchmesser der Zylinderschale $D_e = 2300\text{mm}$

P = Berechnungsdruck $P = 25\text{bar} = 2,5\text{Mpa} = 2,5\text{N/mm}^2$

z = Schweißnahtfaktor, der sich aus der Prüfgruppe und der Werkstoffgruppe herleitet, deren genaue Beschreibung der DIN EN 13445-5 Abschnitt 6 zu entnehmen ist. $z=0,85$

f = Berechnungsspannung, die nach DIN EN 13445-3 Abschnitt 6.1.3 dem kleinsten Wert aus der Berechnung von f_d entspricht.

f_d = maximaler Betrag der Berechnungsspannung für normale Betriebsfälle für austenitische Stähle nach 6.4 DIN EN 13445-3. Bei der Verwendung von austenitischen Stählen ist die Bruchdehnung zu beachten, welche Einfluss auf die Auswahl der Formel für die Berechnungsspannung hat.

Stahlsorte		Erzeugnisform ^{b)}	Dicke mm max.	0,2-%-Dehngrenze	1,0-%-Dehngrenze	Zugfestigkeit R_m MPa	Bruchdehnung		Kerbschlagarbeit (ISO-V)			Beständigkeit gegen interkristalline Korrosion ^{g)}		
Kurzname	Werkstoffnummer			$R_{p0,2}$	$R_{p1,0}$		A_{50mm}^e	A^f	KV	J min.	bei 20 °C (längs)	bei -196 °C (quer)	im Lieferzustand	im sensibilisierten Zustand
							< 3 mm Dicke	≥ 3 mm Dicke						
Austenitisch korrosionsbeständige Stähle														
X2CrNiN18-7	1.4318	C	8	350	380	650 bis 850	35	40	90	60	–	ja	ja	
		H	13,5	330	370									
		P	75	330	370									

Tabelle 11: Mechanische Eigenschaften Austenit

$$f = f_d = \max \left[\left(\frac{R_{p1,0/T}}{1,5} \right); \min \left(\frac{R_{p1,0/T}}{1,2}; \frac{R_{m/T}}{3} \right) \right]$$

$$f = f_d = \max \left[\left(\frac{200N/mm^2}{1,5} \right); \min \left(\frac{200N/mm^2}{1,2}; \frac{440N/mm^2}{3} \right) \right]$$

$$f = 146,67N/mm^2$$

e_n = Nennwanddicke $e_n = e + c + \sigma_e$

c = Korrosionszuschlag Definition nach DIN EN 13445-3 Abschnitt 5.2.1 „Im Rahmen der vorliegenden Europäischen Norm umfasst der Begriff ‚Korrosion‘ Erscheinungen wie Korrosion, Oxidation, Verzunderung, Abrasion, Erosion und alle sonstigen Formen von Abtrag.“ Hier wird $c=0,0mm$ angesetzt, begründet mit der Beständigkeit gegen Korrosion des austenitischen Werkstoffes.

σ_e = Absolutwert der negativen Toleranz der Nennwanddicke für Flacherzeugnis Klasse A nach DIN EN 10029 Tabelle 1 für $25\text{mm} < t \leq 40\text{mm}$ mit $\sigma_e = 0,7\text{mm}$

$$e = \frac{2,5\text{N/mm}^2 * 2300\text{mm}}{2 * 146,67\text{N/mm}^2 * 0,85 + 2,5\text{N/mm}^2}$$

$$e = 22,8321\text{mm}$$

$$e/D_e = 22,83\text{mm}/2300\text{mm} = 0,009 \leq 0,16$$

Somit entfällt der Nachweis der ausführlichen Ermüdungsberechnung für den Mantel.

$$e_n = 22,8321\text{mm} + 0,0\text{mm} + 0,7\text{mm}$$

$$e_n = 23,5321\text{mm}$$

Folglich ist nun noch der Dickenzuschlag σ_e beizufügen der ein glattes Abmaß der Zylinderwanddicke hervorbringt. Dementsprechend wird eine Wandungsstärke von 24,0mm ausgeführt.

14.2 Gewölbter Boden in Klöpperform nach DIN EN 13445-3

Die erforderliche Wanddicke e des Bodens ist gleich dem größten Wert aus e_s , e_y und e_b , wobei die Berechnung von e_b entfällt sobald $e_y > 0,005D_i$ ist.

$$e_s = \frac{P * R}{2f * z - 0,5P}$$

$$e_y = \frac{\beta * P(0,75R + 0,2D_i)}{f}$$

$$e_b = (0,75R + 0,2D_i) \left[\frac{P}{111f_b} \left(\frac{D_i}{r} \right)^{0,825} \right]^{\left(\frac{1}{1,5} \right)}$$

Für die Geometrie eines Klöpperbodens sind folgende Bedingungen einzuhalten:
 $R/D_e = 1,0$ und $r/D_e = 0,1$.

z = Schweißnahtfaktor nach DIN EN 13445-3 für einteilige Boden $z=1,0$

R = Innenradius im Mittelbereich eines torisphärischen Boden $R = D_e = 2300\text{mm}$

D_i = Innendurchmesser des zylindrischen Bordes $D_i = D_e - 2 * e_n = 2252\text{mm}$

D_e = Außendurchmesser des zylindrischen Bordes

P = Berechnungsdruck $P = 25\text{bar} = 2,5\text{Mpa} = 2,5\text{N/mm}^2$

f = Berechnungsspannung die nach DIN EN 13445-3 Abschnitt 6.1.3 dem kleinsten Wert aus der Berechnung von f_d entspricht $f = 146,67\text{N/mm}^2$

f_b = Berechnungsspannung in der Beulgleichung die sich aus $f_b = \frac{R_{p0,2/T}}{1,5}$ ergibt

$f_b = 113,3\text{N/mm}^2$

e_b = erforderliche Wanddicke der Krempe zur Verhinderung plastischen Beulens

e_s = Erforderliche Wanddicke des Bodens zur Begrenzung der Membranspannung in der Mitte

e_y = Erforderliche Wanddicke in der Krenpe zur Verhinderung achssymmetrischen Fließens

β = Berechnungsbeiwert ermittelt aus Bild 7.5-1 und 7.5-2 der in die Berechnung einfließt. Hierbei wird vorerst zur Bestimmung des Wertes eine Wanddicke angenommen, die in diesem Fall der des Zylindermantels entspricht.

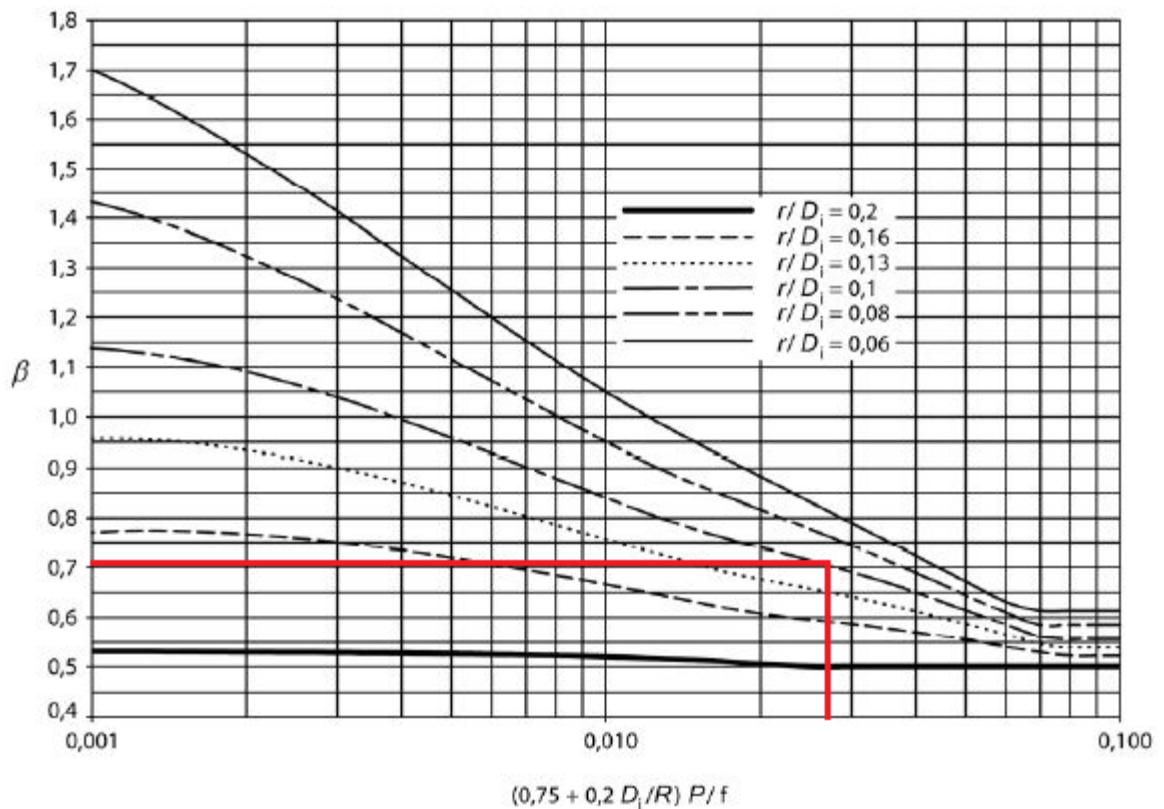


Abbildung 20: Berechnungsbeiwert Beta = 0,76 für Auslegung

Bestimmung von β für die Auslegung des Klöpperbodens

$$r/D_i = 0,1021 \approx 0,1$$

$$(0,75 + 0,2D_i/R) * P/f = 0,01611$$

Daraus resultiert ein Wert für $\beta = 0,76$.

Mit den vorliegenden Werten kann nun die Berechnung erfolgen, um mit dem Größtwert aus e_s , e_y und e_b die Berechnungswanddicke für den Boden zu erhalten.

$$e_s = \frac{2,5 \text{ N/mm}^2 * 2300 \text{ mm}}{2 * 146,67 \text{ N/mm}^2 * 1,0 - 0,5 * 2,5 \text{ N/mm}^2}$$

$$e_s = 19,6817 \text{ mm}$$

$$e_y = \frac{0,76 * 2,5 \text{ N/mm}^2 (0,75 * 2300 \text{ mm} + 0,2 * 2252 \text{ mm})}{146,67 \text{ N/mm}^2}$$

$$e_y = 28,1749 \text{ mm}$$

$$e_y \geq 0,005 * D_i$$

$28,17 \text{ mm} \geq 11,26 \text{ mm}$, somit entfällt die Berechnung von e_b und $e_{\text{Boden}} = e_y$ mit $28,1749 \text{ mm}$.

Mit den folgenden Zuschlägen für Korrosion $c=0,0 \text{ mm}$, e_{ex} als Aufrundungszuschlag und σ_e für die Negativ-Toleranz aus DIN 28011 mit $0,7 \text{ mm}$ ergibt sich ein Wert $e_n = 29,0 \text{ mm}$ für den Boden. Mit den hier ermittelten Werten ist nun ein weiterer Rechengang zur sogenannten „Nachberechnung“ des Bodens durchzuführen. Dieser wird im Punkt 7.5.3.3 der DIN EN 13445-3 beschrieben und fordert eine Umstellung der Gleichungen hin zum Berechnungsdruck.

Der höchste zulässige Berechnungsdruck P_{max} ist demzufolge gleich dem niedrigsten Wert von P_s , P_y und P_b , wobei P_b entfällt, wenn $e_a > 0,005 D_i$ ist. In diesem Verhältnis verbirgt sich der Nachweis auf plastisches Kriechenbeulen. D_i wird nun auch mit den zuvor errechneten Werten ermittelt und beträgt somit 2242 mm .

$$P_s = \frac{2f * z * e_a}{R + 0,5 * e_a}$$

$$P_y = \frac{f * e_a}{\beta * (0,75R + 0,2D_i)}$$

$$P_b = 111f_b \left(\frac{e_a}{0,75R + 0,2D_i} \right)^{1,5} * \left(\frac{r}{D_i} \right)^{0,825}$$

Der nun auch neu zu ermittelnde Wert für β ist nun aus Bild 7.5-2 und den Gleichungen 7.5.3.5 aus der DIN EN 13445-3 herzuleiten.

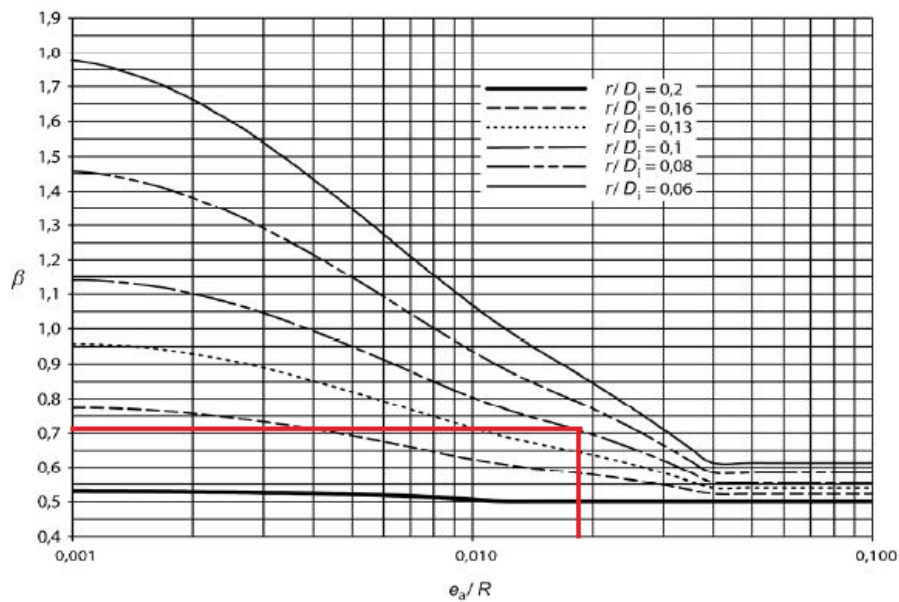


Abbildung 21: Berechnungsbeiwert Beta = 0,76 für Nachberechnung

$$e_a/R = 0,0123 \text{ und } r/D_i = 0,1025 \approx 0,1$$

Woraus sich ein neuer Wert für β mit 0,76 ergibt.

$e_a = e_{min} - c = 28,3\text{mm} > 0,005 \cdot D_i$ mit 11,15mm somit entfällt die Berechnung für P_b .

$$P_s = \frac{2 \cdot 146,67\text{N/mm}^2 \cdot 1,0 \cdot 28,3\text{mm}}{2300\text{mm} + 0,5 \cdot 28,3\text{mm}}$$

$$P_s = 3,588\text{N/mm}^2$$

$$P_y = \frac{146,67\text{N/mm}^2 \cdot 28,3\text{mm}}{0,76 \cdot (0,75 \cdot 2300\text{mm} + 0,2 \cdot 2242\text{mm})}$$

$$P_y = 2,5134\text{N/mm}^2$$

P_y ist der maßgebende Wert, da er der Kleinste der beiden ist und wird somit für die Nachweisführung verwendet.

$$P_{max} = P_y > P$$

$$2,5134\text{N/mm}^2 > 2,5\text{N/mm}^2$$

14.3 Ausschnitt mit Verstärkungsring nach DIN EN 13445-3

Wie zuvor in der Berechnung mit dem Material P295GH wird nun hier das Mannloch in Form eines elliptischen oder länglich runden Ausschnittes mit der Einschweißung einer ringförmigen Verstärkung ausgelegt. Die Verfahren zur Berechnung werden der DIN EN 13445-3 Abschnitt 9 entnommen. Im Punkt 9.4.2 der Norm wird auf die Schätzung der Abmessungen des Stutzens hingewiesen, wodurch der Beschluss gefasst, die einzuschweißende ringförmige Verstärkung aus artgleichem Material X2CrNiN18-7 wie der Behältermantel und der Boden zu fertigen, mit den Abmaßen 150mm x 20mm.

Mit der Annahme, das Mannloch als Einzelausschnitt zu betrachten, sind vorab gewisse Bedingungen zu überprüfen. Hierfür wird die Bedingung

$$l_b \geq a_1 + a_2 + l_{s01} + l_{s02}$$

l_b = Aus der Schale herausragende Länge des Stutzens

a_1, a_2 = Werte für a auf der Stegseite des Ausschnitts Bild 9.6-2 DIN EN 13445-3

l_{s01}, l_{s02} = Zur Ausschnittverstärkung anrechenbare maximale Länge einer Schale, gemessen am mittleren Krümmungsradius der Schale.

aufgestellt, die sich mit den Abstand zur nächsten Störstelle in der Behälterwand beschäftigt. Auf Grund der vorliegenden Abmaße des Rechenbeispiels ist kein weiterer Durchbruch der Behälterwand im Bereich der Zylinderschale geplant und somit entfallen die Werte für a_2 und l_{s02} . Als nächstliegende Unregelmäßigkeit im Spannungsverlauf des Behälters ist die Krempe der Böden zu betrachten, deren Abstand zu beiden Seiten gleich ist.

$$P_{max} = \frac{(Af_s + Af_w) * f_s + Af_b * f_{ob} + Af_p * f_{op}}{(Ap_s + Ap_b) + 0,5 * (Af_s + Af_w + Af_b + Af_p)}$$

r_{is} = Innerer Krümmungsradius der Schale im Ausschnittmittelpunkt

$$r_{is} = \frac{D_e}{2} - e_{as} = 1126,7mm$$

$e_{c,s}$ = ist nach DIN EN 13445-3 Abschnitt 9.3.2 $e_{a,s}$ gleich zu setzen und beträgt 23,3mm

Af_w = Querschnittsfläche der Schweißnaht, diese ist als voll anzunehmen, da eine Durchschweißung vorgesehen ist.

Af_s = Querschnittsfläche der Schale $l'_s * e_{c,s} = 5366,45mm^2$

Af_b = Querschnittsfläche des Stutzens $Af_b=3000mm^2$

f_s = Berechnungsspannung der Schale mit $146,67N/mm^2$

f_{ob} = reduzierte Spannung des Stutzens mit $146,67N/mm^2$ nach Abschnitt 9.5-8 DIN EN 13445-3

Ap_s = Druckbelastete Fläche der Schale mit $451039,42mm^2$

Ap_b = Druckbelastete Fläche des Stutzens mit $18581mm^2$

l_s =Länge der Schale vom Rand eines Ausschnittes oder vom Außendurchmesser eines Stutzens bis zu einer Störstelle in der Schale.

$$P_{max} = \frac{(5366,45mm^2 + 0) * 146,67N/mm^2 + 3000mm^2 * 146,67N/mm^2 + 0 * 0}{(451039,42mm^2 + 18581mm^2) + 0,5 * (5366,45mm^2 + 0 + 3000mm^2 + 0)}$$

$$P_{max} \geq P$$

$$2,5904N/mm^2 \geq 2,5N/mm^2$$

Somit sind die Festigkeitsbedingungen für das Mannloch erfüllt.

15. Gegenüberstellung der Ergebnisse

Nach Abschluss der Berechnungen werden die Ergebnisse der einzelnen Berechnungsverfahren nun hier gegenübergestellt.

Werkstoff	P295GH		X2CrNiN18-7	
Norm	AD 2000	DIN EN 13445	AD 2000	DIN EN 13445
Dicke in mm	28,234379	28,2344	25,7907	23,5321

Tabelle 12: Berechnungswanddicke der Zylindermantel

Für die Berechnung eines ferritischen Werkstoffes wie dem P295GH sind keine Abweichungen im Ergebnis zwischen AD 2000 - Merkblatt und der DIN EN 13445 festzustellen. Begründet ist dies mit dem identischen Berechnungsverfahren in beiden Regelwerken. Eine Abweichung der Ergebnisse weit nach dem Komma lässt sich auf Toleranzen beim Runden zurückführen. Anders sieht es bei der Berechnung eines austenitischen Werkstoffes - wie hier dem X2CrNiN18-7 - aus, wobei eine doch recht große Abweichung der Ergebnisse für die Berechnungswanddicke des Zylindermantels deutlich wird. Begründet ist diese Spreizung der Ergebnisse mit der unterschiedlichen Unterbringung der Sicherheitsfaktoren in der Berechnung. Wo für die Rechnung am Austenit nach AD 2000 der Materialkennwert für $R_{p1,0/T}$ mit dem Sicherheitsbeiwert 1,5 dividiert wird, ist nach DIN EN 13445-3 der Wert f_d entsprechend der Berechnungsspannung f aus $R_{m/T}/3$ separat zu errechnen. Daraus resultiert eine höhere zulässige Spannung bei der Rechnung nach DIN EN 13445 als bei der nach AD 2000 – Merkblatt.

Betrachtet man nun die Ergebnisse für die Berechnungswanddicke der Böden kommt ein ähnlicher Eindruck wie bei den Zylindermänteln zustande.

Werkstoff	P295GH		X2CrNiN18-7	
Norm	AD 2000	DIN EN 13445	AD 2000	DIN EN 13445
Dicke in mm	30,9655	32,3423	28,8147	28,8749

Tabelle 13: Berechnungswanddicke der Böden

Hier unterscheiden sich die Ergebnisse für den ferritischen Stahl P295GH auf Grund der unterschiedlichen Erstellung des Sicherheitskonzeptes und der damit verbundenen Berechnungsfaktoren. In der DIN EN 13445-3 wird mit einem abgeminderten Kennwert für die Widerstandsgröße des Werkstoffes gearbeitet, wogegen beim AD 2000 - Regelwerk ein Sicherheitsfaktor direkt in der Berechnung beigelegt wird. Die Ergebnisse für den Austenit X2CrNiN18-7 erfahren nur Differenzen, die aus Ungenauigkeiten beim Runden resultieren, da die Berechnung mit einem identischen Verfahren durchgeführt wird.

Folglich bleibt noch die Betrachtung der Ergebnisse für das Mannloch, wo ein direkter Vergleich aufgrund des Nachweisverfahrens nur im Grad der Ausnutzung möglich ist. Grundlage des Grades der Ausnutzung bildet eine ringförmige Verstärkung in Form von BL 150x20mm.

Werkstoff	P295GH		X2CrNiN18-7	
Norm	AD 2000	DIN EN 13445	AD 2000	DIN EN 13445
Ausnutzung in %	97,99	94,84 bei 25mm	97,23	96,51

Tabelle 14: Ausnutzung der Spannung im Mannloch

Hervorstechend ist das Ergebnis für P295GH nach DIN EN 13445-3, welches nicht mit der Vorgabe einer Wandstärke von 20mm des Versteifungsringes harmonisiert und somit auf 25mm Wandungsdicke erhöht werden musste. Die Berechnung wird durch die Ermittlung verschiedener mittragender Längen die aus der Geometrie des Grundkörpers und des Stützens zusammengesetzt werden durchgeführt. Aufgrund der Vielzahl von Einflüssen auf die Berechnung lässt sich kein einzelner Wert der die Abweichungen hervorruft feststellen.

16. Fazit

Der Vergleich zwischen den AD 2000 -Merkblättern und der DIN EN 13445 zeigt viele Parallelen und doch auch maßgebende Unterschiede der beiden Regelwerke auf.

Bei genauerer Betrachtung der in der DIN EN 13445 aufgeführten Berechnungsverfahren zeigt sich schnell ihre hohe Komplexität die idealerweise mit einer EDV Lösung zu bearbeiten ist. Im Gegenzug zum AD 2000 - Regelwerk sind hier auch viele weiterführende und äußerst detaillierte Berechnungsverfahren aufgeführt. Welche sich beispielsweise mit rechteckigen Behältern beschäftigen zu denen sich im AD 2000 – Regelwerk keine Berechnungsverfahren finden lassen. Auch bei den Böden kann auf ein breiteres Spektrum der Nachweisführung zurückgegriffen werden. Dies begründet sich mit der Tatsache das die DIN EN 13445 eine Synthese verschiedenen Nationaler Berechnungsvorschriften bildet und so eine Vielzahl von Herangehensweisen vereint.

Das AD 2000 - Regelwerk besticht hingegen durch seinen sachorientierten und leicht nachvollziehbaren Aufbau der selbst nichtmetallische Werkstoffe beinhaltet. Für die Erzielung von verwendbaren Rechenergebnissen bildet es ein in sich geschlossenes System, das alle nötigen Aspekte betrachtet. Im Gegensatz zur DIN EN 13445 mit dem Zugfestigkeitskriterium, wird bei den AD 2000 - Merkblättern mit Teilsicherheitsbeiwerten gearbeitet, was sich oft positiv auf den Materialverbrauch auswirkt.

Eine Entscheidung über die Nutzung eines der beiden Regelwerke wird wohl auch in Zukunft eine Frage geltenden Recht und der vom Auftraggeber geforderten Bedingungen bleiben.

17. Literaturverzeichnis

1. Roloff/Matek: Maschinenelemente
21. Auflage – Wiesbaden: Springer Verlag, 2013
2. Roloff/Matek: Maschinenelemente Tabellenbuch
21. Auflage – Wiesbaden: Springer Verlag, 2013
3. Schneider: Bautabellen für Ingenieure
19.Auflage – Siegen: Werner Verlag, 2010
4. Dietrich Gleich/Richard Weyl: Apparateelemente
Ludwigshafen: Springer Verlag, 2005
5. Verband der TÜV e.V. AD 2000-Regelwerk
8.Auflage – Berlin: Beuth Verlag, 2014
6. DIN EN 13445 : 2013 – 12 unbefeuerte Druckbehälter
7. DIN EN 10028 : 2009 – 07 Flacherzeugnisse aus Druckbehälterstählen
8. DIN EN 10051 : 2011 – 02 Kontinuierlich warmgewalztes Band und Blech abgelängt aus Warmbreitband aus unlegierten und legierten Stählen- Grenzabmaße und Formtoleranzen
9. DIN EN 10029 : 2011 – 02 Warmgewalztes Stahlblech von 3 mm Dicke an - Grenzabmaße und Formtoleranzen
10. DIN 28011 : 2012 – 06 Gewölbter Boden – Klöpperform
11. DIN 28013 : 2012 – 06 Gewölbter Boden- Korbbogenform
12. DIN EN 10204 : 2005 – 01 Metallische Erzeugnisse – Arten von Prüfbescheinigungen
13. www.Druckgeräte-Online.de – Küppers Engineering, 2010
14. DIN – DVS – Taschenbuch: Schweißtechnik 4
10.Auflage – Düsseldorf: Beuth Verlag, 2011
15. Gesellschaft für Schweißtechnik international mbH – Gestaltung geschweißter Druckgeräte – IWE 3.09 Halle/Saale, 2012

18. Eigenständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe. Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Ort, Datum

Vorname Nachname